MAI 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN





> Einstein: Vereinte Kräfte

> Embolien bei Bäumen

> Rasse und DNA

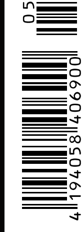
> Kryptografie per Quanten

www.spektrum.de

Urknall

Die sechs größten Missverständnisse





SEIDENSTRASSE

Im Tal der tausend Buddhas

WAHRNEHMUNG

Auf der Spur des Unterbewussten

ERDKLIMA

Wie schnell schmilzt die Westantarktis?



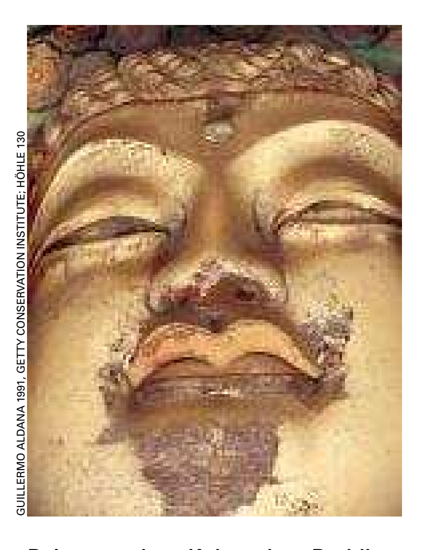
Reinhard Breuer
Chefredakteur

Bäume und Buddhas

Scheinbar Unzusammenhängendes miteinander zu verbinden gehört mit zu den Funktionen eines Magazins. Nur so erhalten Sie die Vielfalt, die Sie erwarten dürfen, Überraschungen inklusive. Diese Spektrum-Ausgabe bietet, meine ich, durchaus Themen, die Sie vielleicht so nicht erwartet hätten: Bäume, Gletscher und Buddhas. Dass Bäume vermenschlicht werden, daran musste ich mich spätestens gewöhnen, seit die Sängerin Alexandra »Mein Freund, der Baum« trällerte. Als ich jetzt lernte, dass sie auch von Embolien befallen werden können, habe ich doch gestaunt. Der junge Botaniker Stefan Mayr von der Universität Innsbruck erforscht dieses spannende Thema. Dahinter steckt die Frage, warum Bäume ab einer bestimmten Höhenlage absterben, was noch keineswegs geklärt ist.

Stefan Mayr ist ein junger Wissenschaftler, der Freude bereitet: Er betreibt unkonventionelle Forschung, für die er bereits erste Preise sammelte. Und er schindet sich bei Wind und Wetter, um in höheren Berglagen Holzproben zu nehmen, die sogleich in Wasser getaucht werden müssen. Das sei, berichten er und sein Koautor Dominik Zeillinger lakonisch, eine »bei Minusgraden und eiskaltem Wind eher unangenehme Tätigkeit« (S. 80).

Eis und Schnee spielen auch in einem anderen Artikel dieser Ausgabe eine entscheidende Rolle. Wie der große Eisschild im Norden von Europa und Sibirien am Ende der letzten Eiszeit verschwand, erkundeten in den letzten Jahren mehrere Gruppen von Glaziologen. Verblüffend ist, wie schnell sich die Eismassen damals – vor 11 000 Jahren – auflösten. Was diese Erkenntnis so bedrohlich macht, ist der Umstand, dass sich etwas Ähnliches in nicht zu ferner Zukunft am Südpol wiederholen könnte. Die Folgen wären fatal: Schmilzt das Schelfeis der Westantarktis, dann erhöht sich der Meeresspiegel um sechs Meter (S. 60).



GUILLERMO ALDANA 1991, GETTY CONSERVATION INSTITUTE; HÖHLE 130

Bekannt als »Kolossaler Buddha« ragt die Statue aus dem Jahr 695 n. Chr. in einer der Mogao-Grotten über 30 Meter hoch hinauf.

Bei solchen Zukunftsvisionen möchte man sich doch eher mit der Vergangenheit beschäftigen! Die Klosteranlage von Mogao, unweit der Stadt Dunhuang an der Seidenstraße, bietet dazu Gelegenheit. Nach achtjähriger Restaurierung wird eine der spektakulärsten der einst tausend Höhlen erneut öffentlich zugänglich (»Höhle Nr. 85«). Buddhistische Mönche legten diese Grotten zwischen dem 5. und 15. Jahrhundert an. Unsere Autorin, die Literaturwissenschaftlerin Lerke von Saalfeld, bereist Südostasien schon seit ihren Studententagen. Seit 1979 war sie zwar schon mehrmals in China, aber erst 1993 besuchte sie die Mogao-Grotten (S. 28). Lerke von Saalfeld schickte mir dazu ein Zitat von Mao: »Wenn du es eilig hast, mache einen Umweg.« Diesmal war sie überpünktlich: Zur Neueröffnung hat sie die Höhle Nr. 85 jetzt wieder besucht.

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Im Anfang war der Urknall – seitdem expandiert das Universum. Doch obwohl das Urknallmodell die Grundlage der modernen Kosmologie darstellt, sorgt seine Interpretation immer wieder für Missverständnisse
Titelgrafik: Claus Schäfer, Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 28

SEIDENSTRASSE

Das Tal der tausend Buddhas

Farbenprächtige Wandmalereien, faszinierende Skulpturen – in der Flussoase Mogao an der Seidenstraße schufen Mönche vor Jahrhunderten buddhistische Kunstwerke ersten Ranges. Heute ist die Pracht bedroht

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 50

WAHRNEHMUNG

Am Rande des Bewusstseins

Durch unterschwellige Darbietung von Ziffern, Worten oder anderen Objekten versuchen Forscher zu ergründen, wie sich bewusste und unbewusste Verarbeitung im Gehirn unterscheiden



SEITE 60

GLAZIOLOGIE

Wie endete die Eiszeit?

Vor rund zehntausend Jahren schmolzen in relativ kurzer Zeit die Eispanzer der letzten Eiszeit. Die Situation könnte sich am Südpol wiederholen, gefolgt von einem Anstieg des Meeresspiegels um sechs Meter





SEITE 68

KRYPTOGRAFIE

Quantenschlüssel

Abhörsichere Quantencodes, bis vor Kurzem noch graue Theorie, kommen nun schon als Produkte auf den Markt





MAI 2005

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



PANTELLERIA-PROJEKT, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Brückenkopf Pantelleria

Auf der idyllischen Insel in der Straße von Sizilien sind deutsche Archäologen dem Krieg zwischen Karthago und Rom auf der Spur – auch in antiken Zisternen

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

Karthago
Dezember 2004

Ceterum censeo Carthaginem esse delendam, so die häufig zitierte Forderung Catos, Karthago endgültig zu vernichten. Die übliche Übersetzung »Im Übrigen bin ich der Meinung ...« scheint mir aber falsch, denn sie übersieht, dass Cato im Lauf seiner Karriere auch Zensor war.

Meines Erachtens benutzte er eine diesem Amt zustehende Formulierung, um durch diese Anmaßung einer staatlichen Autorität die Beweislast umzukehren: Wer Karthago schonen wollte, musste dafür Gründe vorbringen.

Prof. Dieter Meischner, Göttingen

Antwort von Dr. Thomas Kruse, Seminar für Papyrologie, Universität Heidelberg

Leider wissen wir nicht, welche Worte Cato tatsächlich verwandte, denn das Zitat ist das Produkt einer neuzeitlichen lateinischen Übersetzungstradition, die sich erst im 19. Jahrhundert endgültig verfestigt hat.

Zu Grunde liegen Überlieferungen der griechischen Geschichtsschreiber Plutarch und Diodor, wonach Cato in den Senatssitzungen formelhaft einen Satz sprach, dessen Übersetzung aus dem Griechischen lautet: »Ich meine auch, dass Karthago nicht mehr sein soll.« Darauf soll Publius Cornelius Scipio Nasica in ebenso schöner Regelmäßigkeit erwidert haben: »Ich meine, dass Karthago existieren soll.« Unabhängig davon, dass das Zitat nicht authentisch ist, gehörte die Verwendung des Verbs *censere* als Ausdruck einer Meinung zu den Gepflogenheiten im Senat.

Das bezeugt der Gebrauch des Verbums bei Cicero, Caesar oder Livius. Im Bedeutungsumfeld des Zensorenamtes hingegen, das mit der Bewertung von Personen und ihres Vermögens befasst ist, hat *censere* einen Sinn, der in die Debatte um das Schicksal Karthagos nicht recht zu passen scheint.

Lässt sich die Klima-Zeitbombe noch entschärfen?
Januar 2005

Der Autor sagt zu Recht, dass die empirischen Daten aus der Erdgeschichte (hier Eiskerne) die genauesten Informationen über die Klima-Sensitivität liefern. In seiner ersten Grafik (S. 52) zeigt er selbst, dass schon mehrfach vor unserer Zeit ein ähnlich starker Anstieg der Temperatur, des Methan- und des Kohlendioxidgehalts stattgefunden hat. Die einzelnen Zyklen aus dem antarktischen Eis sind sich in der Tat verblüffend ähnlich, wobei nur der letzte Anstieg anthropogen gedeutet werden kann. Aber eben nicht muss!

Die entscheidende Frage, ob die gegenwärtigen Trends der globalen Erwärmung etwas Neuartiges sind oder sich in das Muster der Änderung früherer Jahrtausende einpassen lassen, vermeidet der Autor rätselhafterweise. Er geht nur scheinbar auf dieses Thema ein, da die »kleine Eiszeit« ein viel zu kurzes und unbedeutendes Ereignis ist.

Meines Erachtens haben die derzeitigen Klimamodelle noch viel zu große Lücken, um den Politikern belastbare Handlungsanweisungen in die Hand zu geben. Es wäre zudem wichtig, von den Klimatologen zu erfahren, mit welchen Kalibrierungs-Parametern sie arbeiten und wie groß die Streuung ist.

Alles hier Gesagte bedeutet nicht, dass wir nicht sparsam mit unseren Vorräten an fossiler Energie umgehen sollen. Wir müssen uns in der Tat um die Erhaltung der Schöpfung ernsthaft sorgen und dabei macht der Autor wertvolle Vorschläge.

Dr. Wolfgang Monninger, Essen

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Wenn durch die globale Erwärmung die Eisdecken auf der Antarktis und Grönland zerfallen, kann der Meeresspiegel um Meter steigen.

Der geschmiedete Himmel
November 2004

Allgemein wird die Sternenscheibe von Nebra als die älteste konkrete Darstellung des Himmels bezeichnet. Ich glaube, dass dies nicht stimmt. Im Tempel Tal Qadi auf Malta wurde ein Steinfragment gefunden, in dem ungefähr zwei Dutzend Sterne eingekerbt wurden. Die Oberfläche des Steins wird durch strahlenförmige Linien in fünf Flächen unterteilt, wobei eine Fläche einen Halbmond anstatt Sterne aufweist. Dieses Fragment ist im Archäologischen Museum von Valetta ausgestellt.

Die gesamte maltesische Megalith-Kultur ging um 3500 v. Chr. aus unbekannten Gründen unter. Dieses Bruchstück ist somit deutlich älter als die bronzezeitliche Himmelsscheibe.

Benny Bolzern, Bremgarten, Schweiz

Pyrrhus lässt grüßen
Kommentar, Februar 2005

Die Aufteilung in ein von »bösen« und raffgierigen kommerziellen Verlagen beherrschtes traditionelles Publikationswesen und Open Access als das Gegenmodell der »guten« Not-for-Profit-Initiativen greift deutlich zu kurz.

Während gemeinnützige Fachgesellschaften, wie etwa die American Chemical Society, Open Access sehr kritisch gegenüberstehen, zählen zu den Open-Access-Protagonisten auch kommerzielle Unternehmen wie etwa BioMedCentral.

Unabhängig von der Tatsache, dass bislang keines der Open-Access-Experimente mit dem »Autor zahlt«-Modell einen nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg vorweisen kann – dies gilt für BioMedCentral oder die Public Library of Science (PLoS) ebenso wie zum

Beispiel für das »New Journal of Physics«, das von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und dem britischen Institute of Physics seit seinem Bestehen mit erklecklichen Summen bezuschusst wird –, sieht die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) bei einer ganzen Reihe von Punkten Klärungsbedarf (siehe www.gdch.de/oearbeit/pospap.htm).

Wie kann sichergestellt werden, dass auch im autorenbezahlten Open-Access-Modell ausschließlich die wissenschaftliche Qualität eines Beitrags und nicht die Finanzkraft des Autors über dessen Publikation entscheidet? Dies betrifft u. a. den wissenschaftlichen Nachwuchs, der zu Beginn der Karriere (wo Publikationen in angesehenen Journalen besonders wichtig sind) häufig nicht über ausreichende Ressourcen verfügt.

Wie kann sichergestellt werden, dass nicht auf Grund des Kostendrucks die Qualitätskontrolle in Open-Access-Journalen an Bedeutung verliert? Während im aktuellen Geschäftsmodell die Qualität und Relevanz eines Journals seinen Umsatz maßgeblich bestimmen und damit eine sorgfältige Qualitätskontrolle eine wichtige Komponente für den Erfolg darstellen, sind im Open-Access-Modell möglichst geringe Ablehnungsquoten sowie ein möglichst kostengünstiges (und damit potenziell qualitativ minderwertiges) Qualitätssicherungsverfahren dem wirtschaftlichen Erfolg einer Zeitschrift zuträglich.

Wie kann eine faire Kostenverteilung zwischen akademischen Nutzern und solchen aus der Industrie gewährleistet werden? Ein signifikanter Anteil der institutionellen Subskribenten naturwissenschaftlicher Fachzeitschriften stammt aus dem kommerziellen Bereich. Da die Ergebnisse industrieller Forschung jedoch kaum publiziert werden, führt das »Autor zahlt«-Modell zwangsläufig zu einer Entlastung der Industrie auf Kosten der öffentlich geförderten Forschung.

Bei aller Euphorie für das Open-Access-Modell und den unbestrittenen Problemen des gegenwärtigen Publikationswesens dürfen die in diesen Fragen angesprochenen Risiken, deren Konsequenzen für den Wissenschaftsprozess kaum absehbar sind, nicht verdrängt werden.

Prof. Wolfram Koch, Frankfurt a. M.,
Geschäftsführer der Gesellschaft
Deutscher Chemiker

Ist das Weltall ein Computer?

Januar 2005

Das Weltall ist ein Toaster!

Schaut man sich den Daten- und Energiefluss in einem Toaster an, ist auch jeder Toaster ein Computer. Daraus folgt unmittelbar mein Einstieg.

Aber mal ehrlich, das Weltall mit Computertheorie, welche aus Physik und Mathematik zusammengepuzzelt ist, zu erklären, kommt mir sehr beliebig vor. Da jeder Computer ein Stück Weltall ist, oder anders formuliert ein Stückchen Teilmenge des Alls, wird jede Theorie über ihn immer auch auf das Weltall zutreffen. Über diese Binsenweisheit braucht man aber wohl kaum einen Artikel zu schreiben.

Lediglich die Nicht-Abgeschlossenheit des Systems Computer stellt ein Problem dar. Abgeschlossenheit besitzt das Weltall schließlich schon auf Grund seiner Definition. Man könnte das All sogar so definieren: das einzig bekannte abgeschlossene System.

Dieses Problem könnte man leicht umgehen, indem man argumentiert: Wir vergleichen schließlich Computerwissenschaft mit dem Weltall und nicht Computer an sich. Da aber logische Systeme in sich nie abgeschlossen sein können, sind wir hier wieder an einem Endpunkt. Darf man überhaupt irgendetwas mit dem Weltall vergleichen?

Was soll dieser Artikel? Er erklärt nichts und er stellt keine neuen Theorien auf, er verwechselt nur virtuelle Welten mit nicht objektiv erfahrbarer Realität. Wie ein Kind, das nach Stunden der Hingabe an die virtuelle Welt eines Computerspieles stolz verkündet: Ich habe gewonnen! Gegen wen oder was?

Wer war zuerst da, der Computer oder das All? Die Antwort lautet: der Toaster.

Frank Schock, Konstanz

Leben Viren?

Februar 2005

Auf S. 33: heißt es »Poetischer drückten sich kürzlich zwei Experten ihres Faches aus: Viren führten eine Art geborgtes Leben«. Alles Gute, auch ein guter Ausspruch, wird bekanntlich mehrmals erfunden. Bereits 1957 erschien ein Bändchen von W. Weidel mit dem Titel »Virus: die Geschichte vom geborgten Leben«.

Prof. Gerhard Wagenitz, Göttingen

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

Vom Sinn der Homosexualität Essay, Februar 2005

Sicherung gegen mögliches Defizit im Selektionsangebot

Nicht erst seit Darwin weiß die Menschheit, dass die Sexualität ihren Sinn in der Fortpflanzung findet, so wie die Verdauung den ihren im Stoff- und Energiegewinn. Die Lust an beidem ist nicht der Sinn = Zweck der zuständigen Organe und Funktionen, sondern der Auslöse- und Steuermechanismus für den bedarfsgemäßen Betrieb der jeweils funktionsspezifischen Organsysteme (der Fortpflanzung beziehungsweise des Stoffwechsels).

Dass bei Sättigung die »Lust« am Essen nachlässt, ist natürlich; wenn nicht, kommt es bekanntlich zu schädlicher Fettsucht, ein typisches Entartungsphänomen zum Beispiel bei der Domestikation von Tieren. Dass andererseits der Fortpflanzungs- (Paarungs-)trieb oft über den rein arterhaltenden Bedarf hinausgeht, muss nicht unbedingt schon eine solche Domestikationsentartung darstellen. Dieser Instinkt-Überschuss sichert nämlich das wichtigste aller organismischen Geschäfte gegen ein mögliches Defizit im Selektionsangebot der Arten. Überangebot ist bekanntlich das Fundament aller phylogenetischen Geschäfte; folglich muss der Fortpflanzungs- und Paarungstrieb allgemein besonders stark sein. Hier sei auf den bekannten überschießenden Mord- = Jagdinstinkt der Marder hingewiesen, die beim Einbruch in einen Hühnerstall viel mehr Beute machen, als sie dann fressen können. Bei solchen einzeln jagenden Räubern darf der Jagd- und Tötungsinstinkt nicht so schnell befriedigt sein. Sonst wäre in der Natur (wo es ja keine Ställe gibt) nicht selten die Ausbeute zu gering.

Absichtlich habe ich mich in der Diktion bewegt, die ich der Autorin zum Vorwurf mache: Die Hypothese (nicht Theorie!) der sexuellen Selektion ist – soviel ich weiß – seit Darwin eine solche geblieben, denn auch nach Lorenz hat sich die Vergleichende Verhaltensforschung leider zu wenig Mühe gemacht, sie in fundierten Versuchsserien wissenschaftlich korrekt zu veri- oder falsifizieren. Immerhin hat das speziell mit verschieden »schönen« Pfauenmännern Marion Petrie mit eindeutigem Erfolg schon getan.

Dass Geschlechtsverkehr auch »Mittel zur Pflege von Beziehungen« sei, ist – so dahergesagt – ein alter Hut, das heißt, eine Trivialität ohne wissenschaftlichen Wert. Der neue Begriff der Autorin »soziale Geschlechter« ist nun journalistisch griffig, wissenschaftlich aber eine Tautologie, weil alles Fortpflanzungsdienliche von Natur aus schon ein soziales Phänomen darstellt. Parthenogenese ist kein dauerhaftes Evolutionsmittel.

Allerdings ist der neuzeitlich üblich gewordene humanbiologische Kunstbegriff »Geschlechtsverkehr« (den es in keiner etymologisch gewachsenen Sprache gibt) so unscharf, dass er auf jegliche Betätigung der Sexualeinrichtungen passt. Er ist also in einer fach- = sachgerechten Betrachtung über Sexualität fehl am Platz. Zur Verdeutlichung: Wenn zwei Affenmänner gegenseitig onanieren, haben sie dann Geschlechtsverkehr?

Die Formulierung, dass Sexualität etwas mit »Machtspielen« oder mit der Kontrolle von Rangordnungen zu tun habe, ein »Dazugehörigkeitsmerkmal« liefere oder den »Zutritt zu den Zirkeln der Macht« reguliere und andere soziale (Zusammen-)Lebensmechanismen steuere, das alles sind doch keine seriösen wissenschaftlichen Aussagen, sondern bestenfalls Thesen für noch nötige wissenschaftliche Arbeit.

»Natürlich« kann man Homosexualität als »Kitt für soziale Zusammenschlüsse, die entscheidend zum Lebenserfolg beitragen« sehen, aber wo bleibt da der unbetroffene, objektive Versuch einer sachlichen Argumentation oder gar Beweisführung? Und was die Autorin »Lebenserfolg« nennt, ist nur in menschlich-subjektiver Sicht von nachweisbarer Bedeutung; in objektiver, allgemein organismischer Sicht ist er nur als Fortpflanzungserfolg messbar. Da kommt kein Organismus auf Dauer um Darwins Prinzip herum.

Im angelsächsischen Bereich nimmt der flache Wissenschaftsjournalismus leider deutlich zu und beeinflusst auch das Begriffsinventar und den Formulierungsstil der Forscher immer mehr, vor allem wenn es um Hypothetisches und Theoretisches geht. Die mühevolle Denk- und Säuberungsarbeit unserer »klassischen« Naturforscher geht verloren, nicht zuletzt weil unsere anglophonen Kollegen überhaupt keine »klassischen« Arbeiten mehr lesen (können).

Prof. em. Dr. Dr. h. c. Friedrich Schaller, Wien



Politische Korrektheit

Ich kann mich nicht erinnern, jemals in »Spektrum der Wissenschaft« einen Beitrag gelesen zu haben, der in solchem Maße auf haltlosen Spekulationen und subjektiv-willkürlichen Behauptungen basierte wie dieser.

Sollten Sie so weit gekommen sein, dass das Bemühen um politische Korrektheit einen ebenso hohen Stellenwert hat wie das Bemühen um wissenschaftliche Korrektheit? Ist Ihre Redaktion so verzweifelt über die Tatsache, dass es für die politisch korrekte Behauptung einer anlagebedingten und also natürlichen menschlichen Homosexualität bis heute keine plausiblen Argumente, geschweige denn handfeste Indizien oder gar Beweise gibt, dass sie meint, um der politischen Korrektheit willen zum Instrument wissenschaftlich fragwürdiger Meinungsmache greifen zu müssen?

Reiner Vogels, Essen

SPEKTROGRAMM



► Kein Stern im Arches-Cluster – hier in künstlerischer Darstellung – hat mehr als 150 Sonnenmassen.

ASTRONOMIE

Auch Sterne achten aufs Gewicht

■ Wie groß können Sterne werden? Die Theoretiker sind sich nicht sicher. Zwar sollte der wachsende Strahlungsdruck sich bildender Sterne ab etwa sechzig Sonnenmassen die weitere Anlagerung von Materie verhindern. Allerdings könnten solche relativ kleinen Körper durch Kollisionen sehr wohl zu Objekten verschmelzen, die tausendmal so viel wiegen wie die Sonne. Donald Figer vom Space Telescope Science Institute in Baltimore (Maryland) beschloss deshalb, die Frage durch Beobachtung zu klären.

Je schwerer ein Stern ist, desto heller strahlt und desto schneller verglüht er. Für die Suche nach stellaren Superschwergewichten wählte Figer darum einen der dichtesten Sternenhaufen in der Milchstraße, der mit nur rund 2 Millionen Jahren zudem noch sehr jung ist: den Arches-Cluster. Dieser sollte theoretisch achtzehn Sterne enthalten, die mehr als 500mal so viel wiegen wie die Sonne. Doch als Figer mit der Infrarotkamera des Hubble-Weltraumteleskops nachschaute, entdeckte er kein Objekt mit mehr als 130 Sonnenmassen. Unter Berücksichtigung statistischer Faktoren ergibt sich daraus eine Obergrenze von 150 Sonnenmassen für Sterne. Jetzt sind die Theoretiker gefordert, diesen Befund zu erklären. *Nature, 10.3.2005, S. 192*

BOTANIK

Mechanische Raupe täuscht Pflanze

■ Auch Pflanzen können sich wehren. Sobald nimmersatte Insekten ihre Blätter befallen, schütten sie Duftstoffe wie Hexenylacetat und Linalool aus, um die Plagegeister zu vertreiben. Dabei reagieren sie jedoch nicht einfach auf die Verletzung, sondern wissen wohl zu unterscheiden, ob zum Beispiel eine Raupe oder ein Hagelkorn dahintersteckt. Im letzteren Fall sparen sie sich sinnlose Abwehrmaßnahmen.

Bisher dachte man, das Blatt erkenne den knabbernden Fressfeind an chemischen Substanzen in dessen Speichel. Ein Forscherteam um Axel Mithöfer vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena hat dies nun jedoch widerlegt. Ihm gelang es, eine rein mechanische Raupe zu konstruieren, welche die Limabohne *(Phaseolus lunatus)* hinters Licht führt. Der Apparat namens MecWorm besteht im Wesentlichen aus einem Computer, einem Schrittmotor und einem Metallbolzen. Letzterer befindet sich in einer geschlossenen Box, damit sich die freigesetzten Duftstoffe messen lassen.

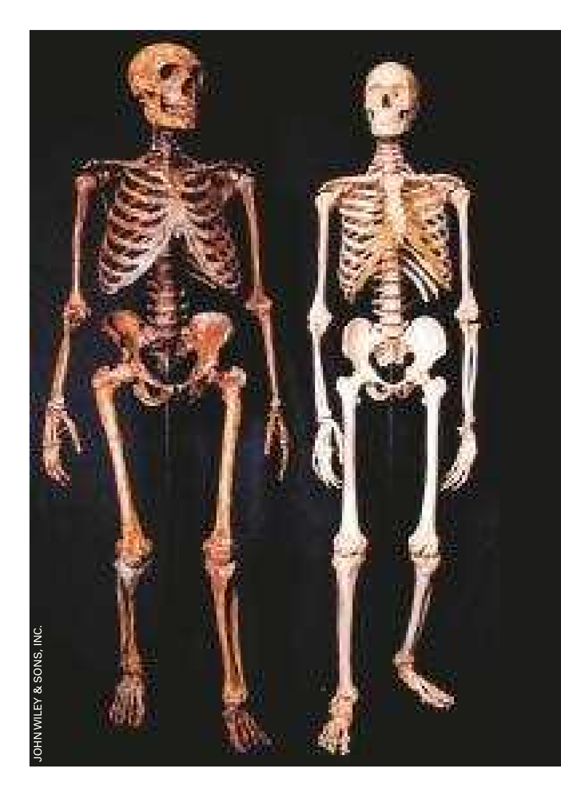
Nach 17 Stunden mit Bolzenschlägen im Fünf-Sekunden-Takt reagierte die Pflanze auf die künstliche Raupe fast genauso wie auf natürliche Feinde. Dagegen schüttete sie keine Duftstoffe aus, wenn die Forscher die Blätter nur mit einer Pinzette oder Rasierklinge verletzten. *Plant Physiology, Bd. 137, S. 1160*

AXEL MITHÖFER, MPI FÜR CHEMISCHE ÖKOLOGIE JENA

◄ Der MecWorm »kaut« so überzeugend an den Blättern, dass sich die Pflanze wie bei echtem Schädlingsbefall mit Duftstoffen wehrt.

PALÄANTHROPOLOGIE

Rekonstruierter Neandertaler



JOHN WILEY & SONS, INC.



DON FIGER, STSCI / NASA

Amerikanische Anthropologen haben einen Neandertaler zum Anfassen geschaffen: Zum ersten Mal wurde das Skelett des Frühmenschen vollständig rekonstruiert. Die Knochenabgüsse sind lebensgroß und beweglich, was einen anschaulichen Vergleich mit der Anatomie des modernen Menschen ermöglicht.

Als Vorlage für die rund 164 Zentimeter große Nachbildung diente ein 50 000 Jahre alter männlicher Frühmensch. Dem 1909 in Frankreich entdeckten Fossil namens »La Ferrassie I« fehlen allerdings einige Knochen vom Brustkorb, von der Wirbelsäule und aus dem Beckenbereich. So weit wie möglich ergänzten Blaine Maley von der Washington-Universität in St. Louis und Gary Sawyer vom Amerikanischen Museum für Naturgeschichte in New York die fehlenden Stücke durch die anderer männlicher Neandertalerfossilien. Bei Knochen, von denen noch keine Exemplare entdeckt wurden, nahmen sie die Gegenstücke des modernen Menschen als Vorlage.

Trotz dieser Detailtreue enthält das nachgebildete Skelett auch künstlerische Elemente, sodass wissenschaftliche Aussagen mit Vorsicht zu genießen sind. Immerhin aber zeigt es zum Beispiel, dass der Oberkörper des Frühmenschen nicht, wie bislang angenommen, die Form einer Tonne hatte, sondern eher glockenartig war.

The Anatomical Record Part B: The New Anatomist, Bd. 283B, Heft 1, S. 23

◀ Das vollständig rekonstruierte Neandertalerskelett (links) ermöglicht erstmals einen direkten Vergleich mit dem Knochenbau des modernen Menschen (rechts).

TECHNIK

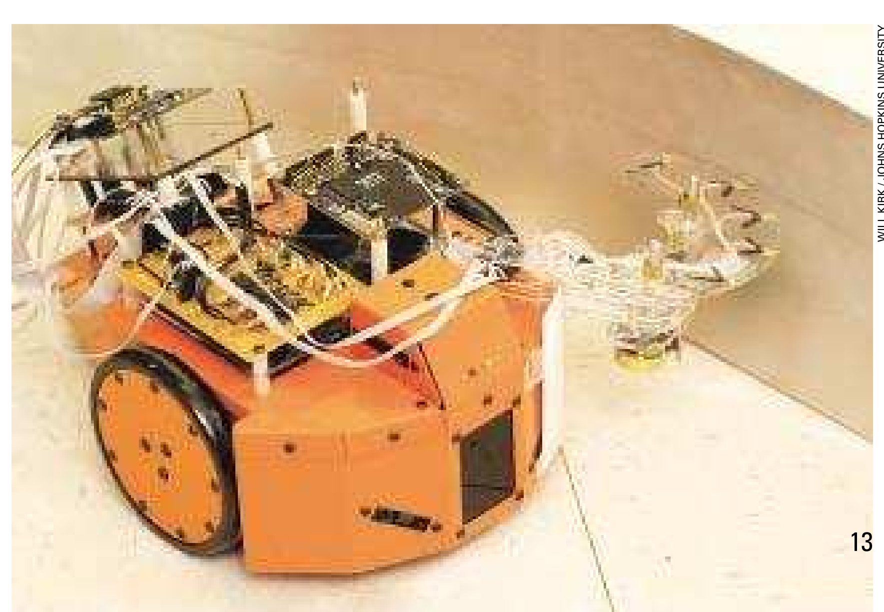
Fühlender Roboter

Über Stock und Stein bei Nacht und Nebel – Kakerlaken schaffen das locker. Auch Roboter können inzwischen – dank optischer oder akustischer Sensoren – elegant an Hindernissen vorbeimanövrieren. Aber wehe, es wird dunkel oder die Oberflächen sind spiegelglatt. Dann versagen die künstlichen Sinne. Küchenschaben dagegen finden sich mit ihren Fühlern auch unter solch erschwerten Bedingungen spielend zurecht.

Noah Cowan von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) und sein Doktorand Owen Loh haben sich das Krabbeltier deshalb jetzt zum Vorbild genommen. Sie verpassten einem fahrbaren Roboter antennenartige Fühler, die sie den Tastorganen der Kakerlaken nachempfunden haben. Im Innern eines biegsamen Plastikschlauchs sind dabei sechs Dehnungsmessstreifen in gummiartiges Urethan eingebettet. Trifft dieser Fühler auf einen Widerstand, krümmt er sich. Die Sensoren senden daraufhin elektrische Signale an einen kleinen Computer, der daraus den Verbiegungswinkel des Schlauchs errechnet und den Roboter rechtzeitig abdrehen lässt. Nach Ansicht der US-Forscher könnte eine solche künstliche Kakerlake etwa nach Erdbeben verschüttete Gebäude erkunden.

Johns Hopkins University, 11.3.2005

▼ Wie eine Küchenschabe kann sich dieser Roboter mit seiner Antenne an der Wand entlangtasten.



WILL KIRK / JOHNS HOPKINS UNIVERSITY



Die neu entdeckten Bodenzeichnungen in Peru zeigen unter anderem menschliche Gestalten mit großen Augen – möglicherweise den »Augengott« der Paracas-Indianer.

MARKUS REINDEL



ARCHÄOLOGIE

Neue Bodenzeichnungen in Peru

Bis zu vierzig Meter große Figuren, in den Wüstenboden an der Südküste Perus geritzt, hat ein deutsch-peruanisches Forscherteam um Markus Reindel vom Deutschen Archäologischen Institut nahe der Stadt Palpa entdeckt.

Die bisher dokumentierten 78 Geoglyphen zeigen Tiere wie Vögel oder Katzenwesen, aber auch Menschengestalten. Die Motive gleichen denen auf Keramiken und kunstvoll bestickten Textilien der Paracas-Kultur, die von 800 bis 200 v. Chr. existierte. Auch das so genannte »Augenwesen«, die Hauptgottheit jener altindianischen Zivilisation, ließ sich identifizieren. Diese Ähnlichkeit legt nahe, dass die Bodenzeichnungen deutlich älter sind als ihre berühmten Gegenstücke aus der nachfolgenden Nasca-Kultur, die sich ebenfalls zu Hunderten in der Umgebung von Palpa finden. Außerdem werden sie regelmäßig von den Geoglyphen aus dieser späteren Zivilisation überlagert. Offenbar reicht die Tradition, überdimensionale Figuren in den Boden zu ritzen, bis in die Paracas-Zeit zurück.

Viele der Geoglyphen befinden sich in schwer zugänglichem Gelände und sind auch aus der Luft kaum zu erkennen. Reindels Team hat sie schon 2003 entdeckt, ist aber erst nach ausgiebiger Kartierung nun an die Öffentlichkeit getreten.

VERHALTEN

Musikalische Termiten

Mit ihrem unersättlichen Appetit auf Holz sind Termiten der Albtraum aller Häuslebauer in den Tropen. Nichtsdestotrotz stellen sie bei der Auswahl ihrer Speisen höchste Ansprüche. Das entdeckten jetzt Wissenschaftler um Theodore Evans von der australischen Forschungsorganisation CSIRO.

So muss zum Beispiel die Länge eines Holzstücks genau stimmen. Je nach Art haben die kleinen Nimmersatte da dezidierte Vorlieben: Die einen mögens kurz, andere medium und wieder andere ellenlang. Um stets den passenden Leckerbissen zu erwischen, »vermessen« die Tierchen mit Hilfe von Vibrationen ihr Fressen, bevor sie sich darüber hermachen. Das bewiesen Evans und sein Team an Arbeitern der Art *Cryptotermes domesticus*, die von Haus aus kurze Stöckchen bevorzugen. Indem die Forscher den Hölzern künstlich die falsche Resonanzfrequenz aufzwangen, konnten sie die Termiten täuschen. Die ließen prompt von den ungewohnt tief brummenden kurzen Stücken ab und nagten lieber an den langen Hölzern, die sie normalerweise verschmähen, deren hoher Ton sie in ihren Ohren aber nun kurz erscheinen ließ. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 8.3.2005, S. 3732*



DAVID MCCLENAGHAN, CSIRO ENTOMOLOGY

Termiten lassen sich Holzstücke schmecken – aber nur wenn sie die richtige Länge haben.

MEDIZIN

Aktiv gegen Alzheimer

Sport und Spiel beugen Alzheimer vor – jedenfalls im Tierversuch. Das haben Sangram Sisodia und seine Kollegen von der Universität Chicago herausgefunden. Sie verglichen die Gehirne toter Mäuse, die in einem Käfig voller Spielgeräte aufgewachsen waren, mit denen von Artgenossen, die nur Futter erhalten hatten. Alle Tiere waren genetisch so verändert, dass sie im Alter von 4,5 Monaten so genannte Plaques im Gehirn entwickelten – extrazelluläre Proteinklumpen, die typisch für die Alzheimer-Krankheit sind. Wie sich zeigte, hatten die Nager im »Fitnesskäfig« weniger Plaques als die bei Wasser und Brot gehaltenen Mäuse. Zudem enthielt das Gehirn der aktiven Tiere mehr von dem Enzym Neprilysin, das die Bildung der Proteinklumpen unterdrückt.

In einem Käfig voller Spielzeug entwickelten Alzheimer-Mäuse weniger Amyloid-Plaques, als wenn sie bei Wasser und Brot gehalten wurden.



ORLY LAZAROW, JOHN ROBINSON, SANGRAM S. SISODIA

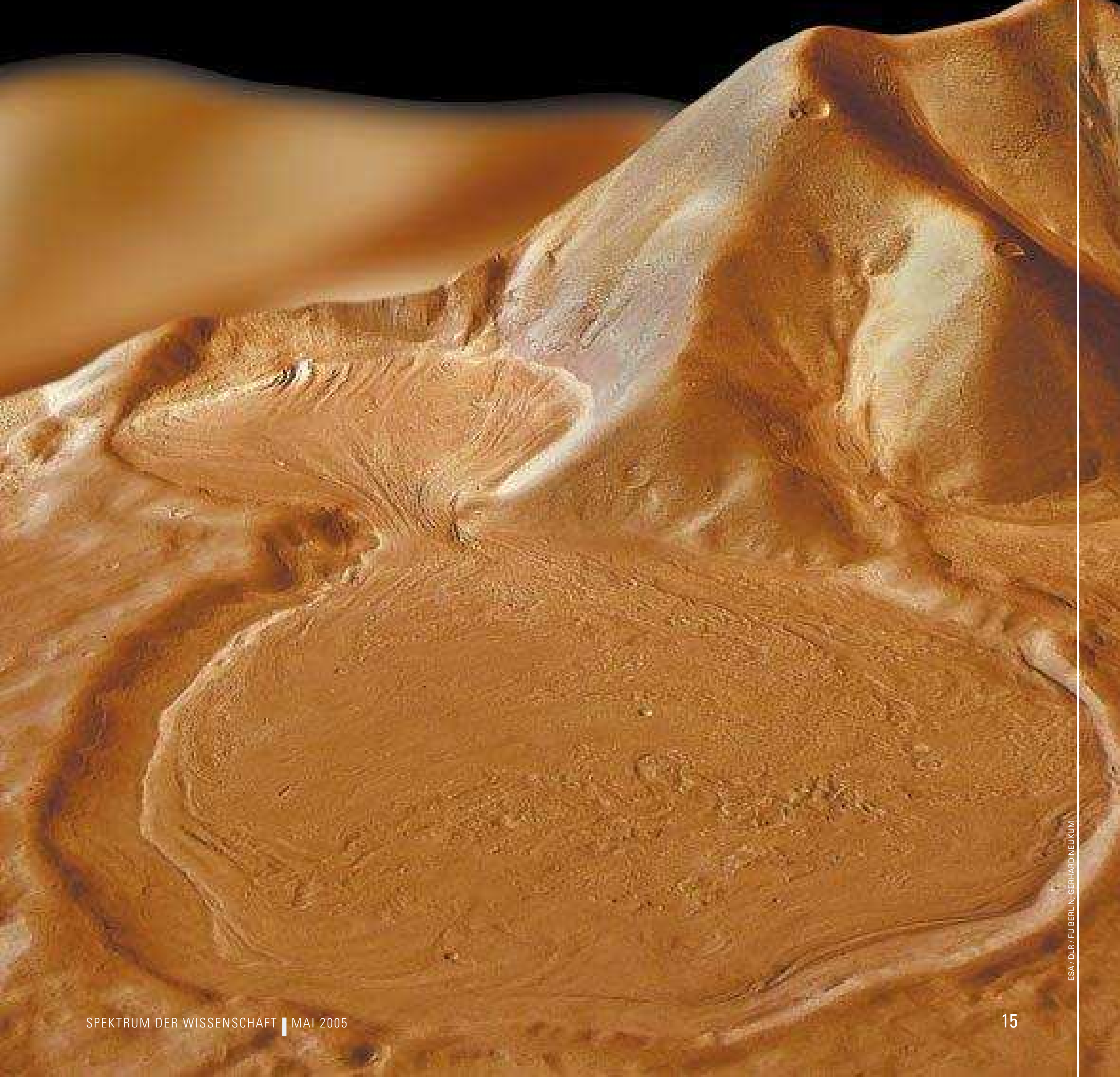
Künftig dürften sich Plaques auch am lebenden Nager – oder Menschen – nachweisen lassen. Forscher um Takaomi Saido vom Riken Brain Science Institute in Wako (Japan) entwickelten eine Fluorverbindung, welche die Blut-Hirn-Schranke passieren kann und sich an die pathologischen Abscheidungen anlagert. Dieser Marker lässt sich, wie Versuche an Mäusen bestätigten, mit speziellen Kernresonanztomografen lokalisieren. Bisher war die Alzheimer-Krankheit erst nach dem Tod sicher diagnostizierbar. Sie schon vor dem Auftreten der ersten Symptome zu erkennen, würde die Therapie erheblich erleichtern. *Cell, 11.3.2005, S. 701, und Nature Neuroscience, 4/2005, S. 527*

Mitarbeit: Eva Hörschgen und Stephanie Hügler

Gletscher auf dem Mars

In mittleren Breiten des Mars finden sich vielfach ausgedehnte Schuttfächer, die darauf hindeuten, dass hier einst eine breiige Masse von einem Abhang herabgeflossen ist. Schon früh vermuteten Planetenforscher, dass Eis als Schmiermittel diese Gesteinsströme in Bewegung gesetzt hat. Seine genaue Menge war jedoch unklar. Neueste dreidimensionale Bilder der hochauflösenden Stereokamera an Bord der europäischen Raumsonde Mars Express machen nun deutlich, dass zumindest einige dieser Fächer Überreste regelrechter Gletscher sind, die noch bis vor wenigen Jahrmillionen über den Marsboden krochen und auf ihrer Oberfläche Gesteinsschutt transportierten.

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel zeigt diese 25fach überhöhte Aufnahme vom Ostrand des Hellas-Beckens. Unterhalb eines 3,5 bis 4 Kilometer hohen Bergrückens liegen zwei schuttgefüllte Krater – elf und sechzehn Kilometer breit – in einer Art Sanduhr-Konfiguration. Den Hals der Sanduhr durchziehen parallele Längsrinnen. Zusammen mit lappenartigen Strukturen (Loben) im Fächer bezeugen sie einen Strom vom oberen in den unteren Krater. Er ähnelt frappierend irdischen Vorlandgletschern. Einbruchtrichter mit zerfressenem Rand lassen erkennen, dass das Eis unter der Schuttschicht großenteils sublimiert ist. Möglicherweise aber sind noch Reste vorhanden.



ESA / DLR / FU BERLIN; GERHARD NEUKUM

ARCHÄOLOGIE

Mordakte geschlossen?

Eine Computertomografie der Mumie sollte endlich Klarheit über die Todesumstände von Tutanchamun bringen. Doch das Ergebnis zeigt nur, dass der berühmte Pharao nicht erschlagen wurde. Warum er so früh starb, bleibt weiterhin offen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die Durchleuchtung des Schädels von Tutanchamun ergab keinen Hinweis auf einen unverheilten Bruch. Zwei lose Knochensplitter – der größere ist hinter der rechten und der kleinere hinter der linken Augenhöhle zu sehen – stammen aus dem Nackenbereich und sind vermutlich erst nach dem Tod abgebrochen, möglicherweise beim Entfernen des Gehirns und Einfüllen der Balsamierflüssigkeit.

Von Cinzia dal Maso

Kein Hinweis auf Tod durch Erschlagen« – so lautet, vereinfacht zusammengefasst, das Urteil eines Teams von Anatomen, Radiologen und Pathologen, das die jüngst angefertigte Computertomografie von Tutanchamun analysiert hat. Vielen der jahrzehntelangen Spekulationen über den Kindkönig und seinen geheimnisvollen frühen Tod dürfte damit der Boden entzogen sein. Der jugendliche Pharao starb offenbar nicht, wie weithin vermutet, durch eine Schädelverletzung auf Grund eines Schlags auf den Hinterkopf. »Ich glaube, der Fall ist damit erledigt«, meinte Zahi Hawass, Generalsekretär von Ägyptens Oberster Antikenverwaltung, bei der Präsentation der Ergebnisse am 8. März. »Der König wird nicht mehr untersucht werden müssen. Wir sollten ihn nun in Frieden ruhen lassen.«

Die Durchleuchtung fand am 5. Januar im Tal der Könige bei Luxor statt. Erstmals seit fast achtzig Jahren hatten Forscher die Mumie wieder aus ihrem Sarkophag geholt. Zur Untersuchung diente ein mobiler Computertomograf auf einem Lastwagenanhänger – ein Geschenk der National Geographic Society und der Firma Siemens Medical Solutions an Ägypten. Das Gerät steht im Mittelpunkt eines auf fünf Jahre angelegten Projekts, bei dem Archäologen, Radiologen, Konservatoren, Paläopathologen und Epidemiologen aus aller Welt möglichst viele Mumien aus dem Pharaonenreich systematisch durchleuchten, analysieren und konservieren wollen – nicht nur die königlichen, sondern auch solche normaler Sterblicher; schließlich geht es den Forschern darum, möglichst umfassende Einblicke in die Lebensverhältnisse und Krankheiten in Altägypten zu gewinnen.

Das Laboratorium ist derzeit pausenlos im Einsatz; selbst am 5. Januar wurden außer Tutanchamun noch fünf andere Mumien durchleuchtet – darunter auch jene, von der die britische Ägyptologin Joann Fletcher kürzlich mit großem Medienecho behauptet hatte, sie sei die der Königin Nofretete. Hawass bestreitet das vehement und geht davon aus, dass die Computertomografie ihm Recht geben wird.

Die Mumie von Tutanchamun, dem weltweit bekanntesten Pharao, schien jedenfalls ideal geeignet, dem Projekt einen medienwirksamen Auftakt zu verschaffen. Deshalb machte sie den Anfang beim Durchleuchten und bei der Bekanntgabe der Untersuchungsergebnisse. Was spielte es da schon für eine Rolle, dass sie in einem ziemlich schlechten Zustand ist – ihr Entdecker Howard Carter beschädigte sie stark, als er die Amulette und die goldene Maske abriss – und dass sie im Vergleich zu anderen Mumien nur dürftige Informationen versprach? Alle Welt wartete auf die Bestätigung oder Widerlegung der Mordtheorie.

Der Radiologe Ronald Harrison von der Universität Liverpool hatte den König im Jahr 1968 schon einmal geröntgt. Er arbeitete damals im Innern des Sarkophags unter extrem schwierigen Bedingungen mit dem einzigen tragbaren Röntgengerät, das es zu jener Zeit in Ägypten gab – einem Siemens-Apparat von 1936. Die Ergebnisse waren in mehreren Punkten unklar, was die Spekulationen ins Kraut schießen ließ.

Wilde Spekulationen

Die Hypothese von einem Schlag auf den Hinterkopf beruhte auf einer dunkel erscheinenden Stelle an der Schädelbasis, möglicherweise einem Blutgerinnsel, und zwei abgelösten Knochensplittern (siehe Bild oben). Das Fehlen des Brustbeins und einiger Rippen legte nahe, dass der Brustkorb des Pharaos eingedrückt worden war – vielleicht bei einem Unfall, bei dem er unter ein Wagenrad geriet oder vom Pferd stürzte.

Andere Forscher glaubten in den Röntgenaufnahmen Beweise für Krankheiten zu entdecken, die für den frühen Tod des Königs verantwortlich gewesen seien. Aus vermeintlich miteinander verschmolzenen Rückenwirbeln schlossen einige, dass Tutanchamun unter dem Klipper-Feil-Syndrom litt, einem Erbleiden, das die Wirbelsäule versteift und die Beweglichkeit des Kopfs einschränkt. Andere vermuteten eine Verbiegung der Wirbelsäule (Skoliose), einen Hirntumor oder das Marfan-Syndrom – eine Bindegewebsschwäche, welche die mutmaßliche Gebrechlichkeit des Pharaos erklären könnte. Krankheiten, ein tödlicher Unfall oder gar Mord – die Spekulationen erreichten ein Ausmaß, bei dem eine Untersuchung mit neueren, aussagekräftigeren Methoden geboten schien, um endlich Klarheit zu schaffen.

Beim Öffnen des Sarkophags gab es keine Überraschung. Die Mumie lag im Innern der Holzkiste, in die Carter sie gelegt hatte – auf Sand gebettet und von einem Baumwolltuch bedeckt. Keiner fasste sie während der Entnahme an, um den ohnehin schon fragilen Körper, der vermutlich bereits in dreizehn Stücke zerbrochen ist, nicht noch mehr zu beschädigen. Die Kiste wurde deshalb samt Mumie aus dem Sarkophag gehievt und in den Computertomografen verfrachtet.

Der Techniker Hani Abdel-Rahman hatte große Bedenken, dass der Sand die

Messung stören würde. Aber nach 1700 Scans, die jeweils im Abstand von etwa einem Millimeter einen Querschnitt durch den Körper zeigten, war er beruhigt. Zusammen lieferten die Einzelaufnahmen ein dreidimensionales Durchleuchtungsbild der Mumie. Besonders der Schädel, der am besten erhaltene Teil, präsentierte sich ausnehmend klar. Dass er keine der vermuteten Verletzungsspuren aufweist, stellte Abdel-Rahman schon in jener kalten Januarnacht fest.

Der endgültige Bericht vom März fügt dem nur wenig hinzu. »Kein Bereich am Hinterkopf enthält Hinweise auf einen unvollständig verheilten Bruch«, heißt es dort. Viele derer, die in der Röntgenaufnahme von 1968 eindeutige Zeichen einer Verdichtung und einer Narbe zu erkennen glauben, überzeugt das freilich nicht. Leider fehlt in der offiziellen Verlautbarung eine ausführlichere Aussage zu diesem heikelsten und umstrittensten Punkt. Allerdings versichert Frank J. Rühli vom Anatomischen Institut der Universität Zürich, der Koleiter des Swiss Mummy Project und Mitglied des Untersuchungsteams ist, dass sich in der Computertomografie kein Bluterguss im Gehirn erkennen lässt.

Zu den abgelösten Knochensplittern vermerkt der Bericht, sie könnten nicht von einer Verletzung vor dem Tod stammen, weil sie dann fest im Balsamierharz eingebettet sein müssten; tatsächlich aber liegen sie frei beweglich außerhalb der Konservierungsmasse. Dieses Argument ist freilich nicht neu. Immerhin zeigte die Computertomografie genau, wo die beiden Splitter hingehören: zu einem Nackenwirbel und zum Hinterhauptloch.

Ein Teil des Teams, das die Aufnahme auswertete und dem außer Hawass und Rühli noch mehrere Ägypter und zwei Italiener angehören, schloss daraus, dass die Knochen vermutlich beim Einfüllen von Balsamierflüssigkeit durch den Nacken absplitterten. Andere Forscher glauben dagegen, dass das Harz wie üblich nur durch die Nase eingeführt wurde.

Allgemein herrschte bisher die Ansicht, die Mumifizierung Tutanchamuns sei hastig und nachlässig erfolgt. Nun aber zeigt die Tomografie, dass der Körper sehr sorgfältig präpariert und mit – vermutlich fünf – verschiedenen Arten von Substanzen behandelt wurde. Das war eine echte Überraschung.

Nicht überraschen konnte dagegen die Bestätigung, dass für das Fehlen des Brustbeins und einiger Rippen sehr wahrscheinlich Carters Team verantwortlich ist. »Eine so schwere Verletzung, dass dabei der halbe Brustkorb weggerissen wurde, hätte mit Sicherheit Spuren im übrigen Skelett hinterlassen«, argumentiert Rühli. Die aber finden sich nicht, was darauf schließen lässt, dass die fehlenden Knochen erst nachträglich herausgebrochen wurden.

Tod durch Beinbruch?

Auch die Krankheitstheorien sind nun Makulatur: Die Tomografie offenbart einen Mann im Alter zwischen achtzehn und zwanzig Jahren in guter körperlicher Verfassung. Er ist zierlich, aber gesund – jemand, der durchaus der Jagd frönen kann, wie die vielen Pfeile und Bogen in seinem Grab nahe legen.

Allerdings fanden sich in seiner Grabkammer auch fast hundert Stöcke, die manche als Gehhilfen deuten. Passend dazu wurde nun ein Bruch im linken Oberschenkelknochen über dem Knie entdeckt. Damit eröffnet sich ein neues Szenario: Starb der Pharao vielleicht an einer Beinverletzung, die sich infizierte?

Wenn es stimmt, dass die Computertomografie viele Spekulationen widerlegt, so dürfte sie zugleich Ausgangspunkt neuer Mutmaßungen werden. Um Tutanchamun rankt sich ein Mythos, und Mythen vergehen nicht. War der Pharao in seiner unversehrten Grabkammer eine der größten archäologischen Entdeckungen aller Zeiten, so bleiben sein Leben und Tod eines der größten Rätsel. Noch immer wissen wir nicht und werden vielleicht nie wissen, wer sein Vater war, wie und warum er schon in so jungen Jahren den Thron bestieg und wie und warum er so früh starb. Auch wenn ihn kein schädelbrechender Schlag auf den Hinterkopf umbrachte, kann er auf andere Art ermordet worden sein.

Eine Gewalttat ist noch immer die wahrscheinlichste Erklärung für seinen Tod. Vielleicht wurde er vergiftet, wie manche vermuten. Er war ein junger, schwacher König in bewegten Zeiten und mag Schwierigkeiten gehabt haben, Freund und Feind zu unterscheiden. Die von dem religiösen Umstürzler Echnaton geprägte Amarna-Periode, an deren Ende er lebte, liegt für uns immer noch ▷

Die Mumie Tutanchamuns wurde, um Beschädigungen beim Herausnehmen zu vermeiden, mitsamt der Holzkiste, in der sie auf Sand ruht, in den Computertomografen geschoben. Links steht Zahi Hawass, Generalsekretär von Ägyptens Oberster Antikenverwaltung.




ANZEIGE

in einem geheimnisvollen Dunkel. »Es ist wie ein Theaterstück«, meinte Hawass, »bei dem wir zwar die meisten Figuren kennen, nicht aber das Ende.« Nun wissen wir noch etwas mehr über eine der Hauptpersonen, ja wir können sogar ihr wahres Gesicht sehen, wie es in dem von Brando Quilici gedrehten Film des »National Geographic« rekonstruiert wurde. Doch das Ende bleibt uns weiterhin verborgen.

Cinzia dal Maso ist freie Wissenschaftsjournalistin in Rom mit besonderem Interesse an der Archäologie.

MEDIZIN

Neue Hoffnung auf Malaria-Impfstoff

Schon seit Jahrzehnten versuchen Mediziner eine Schutzimpfung gegen Malaria zu entwickeln – bislang ohne Erfolg. Gentechnisch entschärfte lebende Erreger könnten nun vielleicht den lang ersehnten Durchbruch bringen.

Von Petra Jacoby

Trotz massiver Bekämpfungsmaßnahmen ist Malaria nach wie vor eine der größten Geißeln der Menschheit – immerhin leben vierzig Prozent der Weltbevölkerung in den tropischen und subtropischen Risikogebieten. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) erkranken jährlich 300 Millionen Menschen an der Seuche und mehr als eine Million stirbt daran. Besonders verheerend wütet die Krankheit in Schwarzafrika, wo über neunzig Prozent der Infektionen stattfinden und der ohnehin krisengeplagten Region eine gewaltige soziale und wirtschaftliche Last aufbürden.

Dass sich Malaria so schwer eindämmen lässt, liegt vor allem an dem komplizierten Vermehrungszyklus des Erregers *Plasmodium falciparum*. Der parasitische Einzeller gelangt über den Stich einer infizierten Mücke der Gattung *Anopheles* in den Menschen und durchläuft in dessen Körper verschiedene Entwicklungsstadien. Zunächst nisten sich die Plasmodien in Leberzellen ein, wo sie sich – ohne Symptome zu verursachen – vielfach teilen. Die Produkte dieser ungeschlechtlichen Vermehrung befallen dann rote Blutkörperchen. Erst in diesem Stadium bricht die Krankheit aus. Einige der Parasiten wachsen in den Blutzellen zu Geschlechtsformen heran, die dann von einem Moskito beim Blutsaugen aufgenommen werden. In der Mücke erfolgt die sexuelle Vermehrung, wobei die für den Menschen infektiösen Partikel – die sichelförmigen Sporozoiten – entstehen.

Diesen Kreislauf gilt es zu unterbrechen, um der Malariaepidemie Einhalt zu gebieten. Allerdings erweisen sich immer mehr Plasmodienstämme gegen die vorhandenen Medikamente als resistent, und auch die Anopheles-Mücken rüsten auf und sind bereits gegen viele Insektizide gefeit. Außerdem ist gerade in den am schlimmsten betroffenen Malariagebieten die medizinische Versorgung vielfach sehr unzulänglich und eine lebensrettende schnelle Behandlung schon bei den ersten Krankheitssymptomen daher meist nicht möglich.

Das Mittel der Wahl im Kampf gegen Malaria wäre deshalb eine vorbeugende Schutzimpfung. Plasmodien sind als tierische Einzeller jedoch viel komplexer als Bakterien oder Viren, weshalb es trotz jahrzehntelanger Bemühungen bisher nicht gelungen ist, einen Impfstoff zu entwickeln. Mit ein Grund dafür könnte sein, dass sich die Forschung auf so genannte Spaltvakzine konzentrierte. Sie bestehen aus Teilstücken von einem oder mehreren Proteinen des Erregers, von denen man weiß, dass das Immunsystem besonders stark auf sie anspricht. Aber anscheinend braucht es eine umfassendere Abwehrreaktion, um die komplexen Malariaerreger in Schach zu halten. Dies demonstrierte gerade erneut eine klinische Studie mit einer Spaltvakzine in Mosambik: Zwar senkte der Impfstoff die Wahrscheinlichkeit eines Malariaanfalls im ersten halben Jahr nach der Verabreichung um dreißig Prozent – eine Infektion mit den Erregern konnte er jedoch nicht verhindern.

Kai Matuschewski und seine Kollegen an der Universität Heidelberg und am Biomedical Research Institute in Seattle verfolgen deshalb eine andere Strategie. Sie versuchen, einen Impfstoff aus kompletten, lebenden Plasmodien herzustellen, der eine vielfältige und somit schlagkräftige Immunantwort auslöst. Dazu entschärfen die Wissenschaftler die Malariaerreger, indem sie gezielt bestimmte Gene ausschalten. Die Plasmodien können dann zwar noch eine Immunreaktion hervorrufen, aber keine Krankheitssymptome mehr verursachen *(Nature, Bd. 433, S. 164)*. Im Gegensatz zum gängigen Verfahren, die Parasiten abzuschwächen, indem man sie bestrahlt, funktioniert die gentechnische Methode hochpräzise. Malariainfektionen durch einen fehlerhaften Impfstoff sind daher ausgeschlossen.

Lohn der Geduld

Die kniffligste Aufgabe bei diesem Ansatz ist, ein Gen aufzuspüren, das sich als Angriffsziel eignet; denn mehrere Faktoren gilt es dabei zu beachten. Der beste und sicherste Schutz lässt sich erzielen, wenn die Impfplasmodien im infektiösen Sporozoitenstadium verabreicht werden, das auch unter natürlichen Bedingungen beim Moskitostich übertragen wird. Damit die genmanipulierten Erreger ihre Mission erfüllen können, sollen sie zwar in der Lage sein, sich nach der Impfung ganz normal in Leberzellen einzuquartieren und das Immunsystem zu alarmieren. Dann aber muss ihre weitere Entwicklung stoppen, damit nicht die gefährlichen Plasmodienformen entste-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Stechmücken der Gattung *Anopheles*, hier ein Weibchen beim Blutsaugen, sind die Überträger der Malaria.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Beim Stechen übertragen die Anopheles-Mücken den Malariaerreger *Plasmodium falciparum* im Sporozoitenstadium – rot gefärbte Gebilde auf dieser mikroskopischen Aufnahme der Moskitospeicheldrüse. Genetisch veränderte Sporozoiten, bei denen das Gen UIS3 zerstört wurde, haben sich im Tierversuch als wirksamer und sicherer Impfstoff erwiesen.

hen, die in rote Blutkörperchen eindringen und die malariatypischen Fieberanfälle auslösen.

Immerhin wurde die Fahndung nach einem geeigneten Angriffsziel in letzter Zeit dadurch erleichtert, dass seit einigen Jahren das Erbgut von *P. falciparum* komplett entziffert ist. Um die Suche einzugrenzen, beschränkten sich Matuschewski und seine Kollegen außerdem auf Gene, die nur in dem infektiösen Sporozoiten- und dem anschließenden Leberstadium aktiv sind. Mit viel Geduld fanden sie so schließlich einen aussichtsreichen Kandidaten namens UIS3 (abgekürzt für: *upregulated in infective sporozoites*).

Die Versuche damit konnten sie zwar nicht an Menschen durchführen. Aber zum Glück gibt es ein geeignetes Tiermodell: Das mit *P. falciparum* verwandte *P. berghei* befällt Nager und ruft dort Malariasymptome hervor. Die vom UIS3-Gen beider Plasmodien kodierte Aminosäuresequenz stimmt zu 34 Prozent überein.

Matuschewski und seine Kollegen zerstörten also dieses Gen in *P. berghei* und vermehrten die so abgeschwächten Erreger dann in Anopheles-Mücken. Die resultierenden Sporozoiten testeten sie an kultivierten Leberzellen.

Dabei zeigte sich, dass die genetisch veränderten Parasiten die heikle Gratwanderung zwischen normaler Leberphase und Abbruch der Entwicklung kurz vor dem Blutstadium perfekt beherrschen: Es entstanden keinerlei Plasmodienformen, die in rote Blutkörperchen überwechseln konnten. Auch Ratten, denen extrem hohe Dosen der abgeschwächten Impfsporozoiten injiziert wurden, entwickelten keine krank machenden Blutstadien.

Damit war die Ungefährlichkeit der genetisch veränderten Plasmodien bewiesen. Aber würden sie auch eine ausreichend starke Immunreaktion bewirken? Um das zu überprüfen, impften die Wissenschaftler Mäuse zunächst im Abstand von jeweils einer Woche mit drei Dosen Sporozoiten ohne UIS3-Gen. Ein bis vier Wochen später injizierten sie dann eine große Menge infektiöser normaler Plasmodien.

Das Ergebnis war eindrucksvoll: Keine einzige geimpfte Maus steckte sich an, ▷

▷ während sämtliche nicht immunisierten Kontrolltiere nach drei bis vier Tagen an Malaria erkrankten. Selbst zwei Monate danach waren die behandelten Tiere noch vollständig vor einer Infektion geschützt und auch immun gegen Stiche infizierter Anopheles-Mücken.

Dieser Erfolg ist umso erfreulicher, als dieselben Forscher mit einem anderen Gen namens UIS4, das zunächst ebenfalls viel versprechend aussah, weniger gute Erfahrungen machten *(Proceedings of the National Academy of Sciences, 22.2.2005, S. 3022)*. Ebenso wie UIS3 ist es ausschließlich aktiv, solange sich die Malariaerreger in den Leberzellen aufhalten.

Plasmodien ohne dieses Gen bewirkten in Mäusen zwar auch eine schützende Immunantwort gegen Malaria; allerdings erwies sich der Impfstoff als nicht so sicher wie die UIS3-Vakzine: Immerhin erreichten die genmanipulierten Erreger bei 36 Prozent der geimpften Tiere das gefährliche Blutstadium. Dies zeigt, wie heikel die Entwicklung gentechnisch abgeschwächter Lebendimpfstoffe ist – aber der Erfolg mit UIS3 belegt ihre prinzipielle Machbarkeit.

Als Nächstes wollen Matuschewski und seine Kollegen nun von *P. falciparum*, dem Erreger der Malaria beim Menschen, eine Vakzine mit eliminiertem UIS3-Gen herstellen. Damit besteht berechtigte Hoffnung, in absehbarer Zeit vielleicht endlich die dringend benötigte Schutzimpfung gegen die Seuche in der Hand zu haben. Hürden gibt es allerdings noch genügend. Die größte besteht wohl darin, dass sich die gentechnisch abgeschwächten Sporozoiten bisher nur in Moskitos selbst züchten lassen. Dieses Verfahren ist jedoch sehr aufwändig und entsprechend teuer sowie für eine Massenproduktion nicht geeignet. Erst wenn es gelänge, den Lebendimpfstoff in Zellkultur zu erzeugen, wäre der ganz große Durchbruch geschafft.

Petra Jacoby ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.

NACHGEHAKT

Ertrunken in der Zahlenflut

Wissen Sie Ihre Handy-Nummer auswendig? Würden Sie die 16-stellige Ziffernfolge Ihrer Kreditkarte wiedererkennen? Oder haben Sie bereits Schwierigkeiten mit den vierstelligen Geheimzahlen für EC-Karte und Handy?

Die digitale Technik der Gegenwart reduziert nicht nur alles zu Zahlen, sie umstellt uns auch mit Zahlen. Manche müssen wir uns merken (etwa die Geheimzahl), manche sollten wir erkennen (zum Beispiel die Bankverbindung), und viele können wir ganz einfach vergessen – so die Telefon-Nummern, die digital im Handy gespeichert sind.

Doch die Evolution hat uns für den Umgang mit dieser Zahlenflut nur sehr dürftig ausgestattet. Nach den Erkenntnissen der Neurowissenschaft sind dem Menschen zwar sowohl ein analoges als auch ein digitales Erkennungssystem für Mengen angeboren *(Trends in Cognitive Sciences, Bd. 8, S. 307)*. Doch leider reichen beide nicht sehr weit. Zwar können schon Babys abschätzen, welche von zwei Gruppen mehr Objekte enthält – aber nur wenn das Zahlenverhältnis mindestens 3:2 beträgt. Bis zum Erwachsenenalter verbessert sich diese Schätzfunktion auf etwa 8:7. Wenn wir also vor zwei Schüsseln mit zehn und elf Bonbons stehen, müssen die meisten von uns schon nachzählen, um festzustellen, welche mehr enthält.

Ähnlich dürftig ist das angeborene digitale Erkennungssystem. Den jüngsten Vertretern unserer Spezies ermöglicht es gerade einmal, bis zu drei Objekte auf einen Blick zu erfassen. Auch diese Fähigkeit verbessert sich beim Heranwachsen nur graduell, und die wenigsten Menschen können auf Anhieb erkennen, dass genau elf Bonbons in der Schüssel liegen. Die anderen behelfen sich, indem sie auf die sprachliche Benennung der Zahlen, also erlernte Fähigkeiten zurückgreifen.

Ins Extrem getrieben ist diese mühsam erworbene Fertigkeit bei Zahlenkünstlern wie dem Bonner Informatiker Gert Mittring, der kürzlich Schlagzeilen machte, weil er in weniger als zwölf Sekunden die 13. Wurzel aus einer hundertstelligen Zahl zog. Dabei benutzte er eine Kombination von erstaunlichen Gedächtnisleistungen, Abschätzungen und schnellem Kopfrechnen.

Rechenkünstler wie Mittring haben ganze Logarithmentafeln im Gedächtnis abgespeichert. Damit schaffen sie es zum Beispiel, allein aus den ersten fünf Ziffern einer hundertstelligen Zahl die ersten fünf Stellen der achtstelligen Lösung zu bestimmen. Abschätzungen sind erforderlich, weil sich selbst die besten Gedächtnisakrobaten Logarithmen nur mit einer begrenzten Zahl von Stellen merken können. Die letzten drei Stellen der Lösung lassen sich dann den letzen drei Ziffern der Ausgangszahl zuordnen. Zum Beispiel ist die letzte Ziffer von Ausgangszahl und 13. Wurzel immer identisch.

Uns numerologischen Normalverbrauchern aber hat das Überangebot an Zahlen in Verbindung mit der Allgegenwart elektronischer Rechenhilfen die Beziehung zu Zahlen eher ausgetrieben. Als Angehöriger der letzten Generation, die noch mit Rechenschieber statt Taschenrechner in die weiterführende Schule ging, fühle ich mich fast schon als Fossil. In einer Welt ohne Tabellenkalkulationsprogramme und Handys war Kopfrechnen nützlich. Doch der heutigen Schülergeneration muss es atavistisch vorkommen. Meine Kinder zum Beispiel sehen kaum noch ein, warum sie das kleine Einmaleins lernen sollen. Dass ich 16 mal 16 auswendig weiß, halten sie für ebenso nutzlos wie das Ziehen 13. Wurzeln aus hundertstelligen Zahlen.

Mathematiklehrer mögen es bedauern, aber im Sinne eines ökonomischen Umgangs mit der Ressource Gedächtnis erscheint es durchaus plausibel, auf überflüssigen Wissensballast wie das kleine Einmaleins zu verzichten. So paradox es klingt: Wie einst in der Steinzeit kann sich der Mensch heute wieder auf sein minimales angeborenes Zahlenverständnis beschränken – und den Rest elektronischen Rechenhilfen überlassen. Wehe nur, wenn diese einmal versagen!

Michael Groß
www.proseandpassion.com

Lichtschwach, aber gewichtig

Erstmals ließ sich bei einem fernen Himmelskörper sehr kleiner Masse die Leuchtkraft bestimmen. Sie erwies sich als unerwartet gering. Bei massearmen Objekten gilt die übliche Masse-Leuchtkraft-Relation also nicht – viele von ihnen wurden wohl falsch klassifiziert.

Von Rainer Lenzen und Wolfgang Brandner

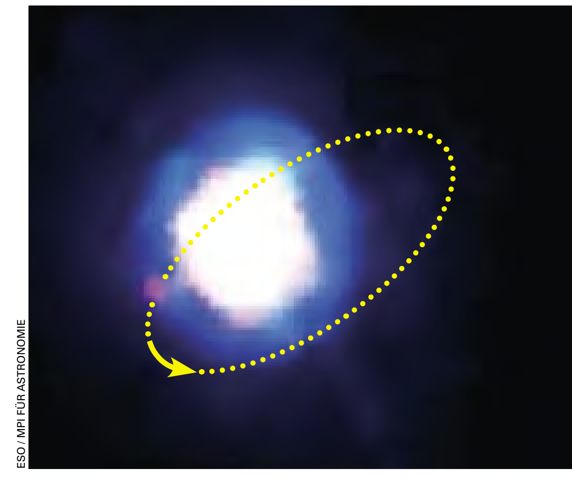
Das Gewicht eines weit entfernten Objekts allein durch Augenschein zu bestimmen, ist in der Regel ein hoffnungsloses Unterfangen. Astronomen ermitteln die Masse eines Sterns deshalb im Allgemeinen indirekt, indem sie seine Leuchtkraft messen und die wohldefinierte – auch theoretisch verstandene – Masse-Leuchtkraft-Beziehung anwenden. Für normale Sterne wie unsere Sonne, die ihre Strahlungsenergie aus Kernprozessen in ihrem Innern gewinnen, funktioniert dieses Verfahren recht zuverlässig. Die Relation lässt sich an geeigneten Doppelsternen, deren gegenseitige Umlaufbahn und -geschwindigkeit Rückschlüsse auf ihre gemeinsame Masse erlaubt, überprüfen und eichen. Dabei hat sie sich immer wieder ausgezeichnet bestätigt.

Anders verhält es sich bei sehr jungen, massearmen Sternen oder gar substellaren Objekten, die ihre Strahlungsenergie aus anderen Quellen beziehen. Hier ist die Beziehung zwischen Gewicht und Leuchtkraft nicht so genau bekannt und war bisher nur theoretisch abschätzbar. Andererseits hat die Masse substellarer Objekte, zu denen die Planeten oder so genannte Braune Zwerge gehören (siehe Kasten auf S. 24), besondere Bedeutung in der modernen Astronomie. Ihre genaue Kenntnis hilft, die Theorien der Sternentwicklung und der Bildung von Planetensystemen um ferne Sonnen zu überprüfen und zu verfeinern.

In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern an der Universität von Arizona in Tucson und der Universität Valencia ist es uns kürzlich erstmals gelungen, sowohl die Masse als auch die Temperatur und damit die Leuchtkraft eines mit 0,09 Sonnenmassen ausgesprochen leichtgewichtigen Sterns unabhängig voneinander zu bestimmen *(Nature, Bd. 433, S. 286)*. Er gehört zu dem Objekt AB Doradus, das sich nur 48 Lichtjahre entfernt im Sternbild Schwertfisch befindet.

Ein unsichtbarer Begleiter

Dieses Objekt ist, wie mehrere unabhängige Altersbestimmungen ergaben, mit etwa 50 Millionen Jahren noch sehr jung. Es lässt sich bereits mit kleinen Teleskopen in zwei Sterne auflösen, die einander im Abstand von 9,1 Bogensekunden umkreisen – was 135 Erdbahnradien entspricht, gut dem Vierfachen des Abstands zwischen der Sonne und dem äußersten Planeten Pluto.



ESO / MPI FÜR ASTRONOMIE

Auf diesem Falschfarben-Infrarot-Bild von AB Doradus A erscheint der bisher unsichtbare Begleiter als violetter Punkt bei 8 Uhr. Er leuchtet 120-mal schwächer als sein Hauptstern, hat 93 Jupitermassen und braucht 11,75 Jahre für einen Umlauf. Seine Bahn ist als gelbe Ellipse dargestellt.

Seit 1997 weiß man, dass die Komponente A dieses Binärsystems ihrerseits einen massearmen Begleiter hat, der sie mit einer Periode von 11,75 Jahren umkreist. Zwar war er bisher nicht direkt sichtbar, aber exakte Positionsbestimmungen des Hauptsterns mittels Radio-Interferometrie zeigten eine Wackelbewegung, die den verborgenen Trabanten verriet. Er bewegt sich demnach auf einer elliptischen Bahn, die um 67 Grad gegen die Himmelsebene geneigt ist. Würde man nun die Masse des Primärsterns kennen, könnte man die des Begleiters aus dem dritten Kepler'schen ▷



Der Nachweis des Begleiters von AB Doradus A gelang mit einer Spezialkamera am Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (Eso). Der 8-Meter-Spiegel befindet sich links vom Bildrand. Von dort fällt das Sternenlicht durch den Rotator (dunkelblauer Ring) und die adaptive Optik (hellblauer Zylinder) in die eigentliche Kamera (roter Behälter in der Bildmitte).

Gesetz berechnen. Tatsächlich strahlt der Hauptstern hell genug, dass sich die oben genannte Masse-Leuchtkraft-Relation darauf anwenden lässt. Demnach enthält er 0,89 und sein Begleiter entsprechend 0,09 Sonnenmassen.

Sehr viel schwieriger war es, die Temperatur des Trabanten zu bestimmen. Normalerweise macht man dazu eine Spektralanalyse der von dem Himmelskörper ausgesandten Strahlung. Doch wie das anstellen, wenn das Objekt unsichtbar ist? Um den Begleiter überhaupt sehen zu können, brauchte man eine hochauflösende Kamera, die ihn in unmittelbarer Umgebung des 120-mal helleren Zentralsterns zeigte – was wegen der Bildunschärfe, die von Dichteschwankungen in der Atmosphäre herrührt, bis vor Kurzem aussichtslos erschien. Versuche, den Begleiter mit dem Hubble-Weltraum-Observatorium zu finden, schlugen ebenfalls fehl. Weil das außerirdische Teleskop nur einen Durchmesser von 2,4 Metern hat, reicht seine Bildschärfe nicht aus, um ein Maß an Kontrast und Auflösung zu bieten, das für die Abbildung eines solchen Objekts nötig wäre.

In dieser Situation kam uns zugute, dass wir gemeinsam mit französischen Kollegen für die Suche nach außerirdischen Planetensystemen in den letzten Jahren eine Infrarotkamera (NACO SDI, siehe Kasten) entwickelt hatten, die darauf spezialisiert ist, besonders schwache Quellen in nächster Umgebung von Sternen zu entdecken. Sie kommt in Verbindung mit einem der vier 8-Meter-Spiegel des Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (Eso) auf dem Berg Paranal in Chile zum Einsatz.

Braune Zwerge im Visier einer Spezialkamera

Als Braune Zwerge bezeichnet man substellare Objekte, die zu leicht sind, um eine stabile Wasserstofffusion in ihrem Kern zu unterhalten, aber kurzzeitig – bis zu einige 10 Millionen Jahre lang – Energie aus der Verschmelzung des Wasserstoffisotops Deuterium gewinnen können. Die Untergrenze für diese Kernreaktion liegt bei 0,013 Sonnenmassen; oberhalb von 0,075 Sonnenmassen setzt die stabile Fusion von Protonen ein. Planeten sind kleiner und leichter als Braune Zwerge und können überhaupt keine Fusionsenergie erzeugen.

Die Kamera NACO SDI *(Nasmyth Adaptive Optic System Simultanous Differential Imager)* eignet sich speziell für den Nachweis und die Untersuchung schwacher Objekte dicht neben hellen Sternen. Sie wurde für eines der größten optischen Teleskope gebaut, das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (Eso), und nutzt die sehr hohe Auflösung eines der vier 8-Meter-Spiegel dieses Observatoriums.

Das von diesem gesammelte Licht wird zunächst (durch adaptive Optik) von atmosphärischen Störungen befreit, was die Bildschärfe bereits um den Faktor zehn verbessert. Die korrigierte Aufnahme fällt dann in den auf –200 Grad Celsius gekühlten Kamerateil (Conica), in dem alles bis auf ein kleines Bildsegment ausgeblendet wird, in vier parallele Bilder aufgespaltet, vergrößert und auf den Infrarotdetektor projiziert wird.

Dabei durchlaufen die vier Einzelbilder verschiedene Infrarotfilter, sodass vier zeitgleiche Aufnahmen entstehen, die sich in der Wellenlänge geringfügig unterscheiden. Ihr Vergleich ermöglicht die Korrektur restlicher Bildfehler, was die Nachweisgrenze für schwache Begleiter noch einmal deutlich erhöht. NACO SDI dient vor allem zur Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems.

Raffinierter Bandentrick

Dieses Teleskop verfügt über eine so genannte adaptive Optik, die erst seit Beginn der 1990er Jahre durch die Entwicklung leistungsstarker Rechner möglich wurde. Dazu misst man die Störungen durch die Atmosphäre parallel und korrigiert sie, sodass die Bildschärfe wieder den vom Spiegeldurchmesser vorgegebenen hohen Wert erreicht.

Um das Licht des hellen Hauptsterns weit gehend auszublenden, nutzt unsere spezielle Kamera außerdem die Tatsache, dass kühle Himmelskörper (wie Planeten) eine typische Methan-Absorptionslinie bei 1,6 Mikrometern aufweisen. Eine Aufnahme bei dieser Wellenlänge zeigt folglich nur den Hauptstern, während eine bei etwas kürzerer Wellenlänge zusätzlich das gesuchte Objekt enthält, das somit bei der Subtraktion der beiden Bilder übrig bleibt.

Mit diesen Tricks gelang es uns tatsächlich erstmals, den Begleiter von AB Doradus A im Abstand von 0,16 Bogensekunden an der erwarteten Position abzubilden. Zudem konnten wir sein Spektrum aufnehmen, das Aufschluss über seine Temperatur sowie einige chemische Charakteristika gab. So weist die Tiefe der Natrium-I-Absorptionslinie bei 2,2 Mikrometern auf eine niedrige Schwerebeschleunigung an der Oberfläche hin – in Einklang mit der geringen Masse.



▷ Der gesamte Verlauf des Spektrums stimmt gut mit dem eines Sterns vom Spektraltyp M8 überein. Demnach beträgt die Oberflächentempertur 2600 Kelvin. Nach gängigen Modellrechnungen steht dies aber im Widerspruch zu der gemessenen Masse: Ein Stern mit 0,09 Sonnenmassen und einem Alter von 50 Millionen Jahren sollte fast 3000 Kelvin heiß sein. Geht man umgekehrt von der gemessenen Temperatur aus, liefern die theoretischen Modelle eine um den Faktor zwei zu kleine Masse.

Masse leichter Himmelskörper bisher unterschätzt

Ein junges, kühles Objekt hat sich somit als doppelt so schwer wie erwartet erwiesen. Das könnte gravierende Folgen für weite Bereiche der Astronomie haben: Eine Vielzahl kleiner Himmelskörper, deren Masse aus ihrer Temperatur abgeleitet wurde, wiegt womöglich gleichfalls deutlich mehr als bisher gedacht.

Das gilt etwa für so genannte Haufenplaneten, die Astronomen beim Durchmustern junger Sternhaufen gefunden haben. Sie sind demnach vermutlich eher Braune Zwerge mit mehr als 0,013 Sonnenmassen. Desgleichen dürfte es sich bei vielen Objekten, die als junge Braune Zwerge klassifiziert wurden, in Wahrheit um kleine Sterne mit mehr als 0,075 Sonnenmassen handeln.

Generell wurde bisher also in jungen Sternhaufen die Zahl der massearmen Sterne unter- und die der substellaren Objekte überschätzt. Offenbar beschreiben die gängigen Modelle bei jungen leichtgewichtigen Sternen, Braunen Zwergen oder gar Planeten den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Masse nicht korrekt. Die Theoretiker sind somit gefordert, die Unstimmigkeiten zu klären und zu beseitigen. Bis dahin bleibt es fragwürdig, die Masse eines Himmelskörpers allein aus seiner Temperatur abzuleiten.

Rainer Lenzen forscht als wissenschaftlicher Angestellter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg auf dem Gebiet der Planeten- und Sternentstehung. Er war maßgeblich an der Entwicklung der Spezialkamera für das VLT beteiligt. **Wolfgang Brandner** ist seit zwei Jahren wissenschaftlicher Mitarbeiter am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie und war zuvor bei der Universität von Hawaii in Hilo und der Europäischen Südsternwarte in Chile für die Inbetriebnahme von Instrumenten mit adaptiver Optik zuständig.

Springers EINWÜRFE

von Michael Springer

Fruchtbar falsch!

Wie Negativresultate die Wissenschaft vorantreiben

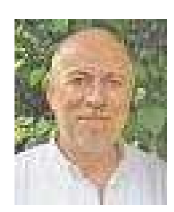
Im Internet erscheinen seit einigen Monaten Foren und Journale, die sich auf das Publizieren gescheiterter Experimente spezialisieren. Sie tragen Namen wie »Journal of Negative Results – Ecology & Evolutionary Biology«. Die im Gründungseditorial dieser Online-Zeitschrift (November 2004) aufgeführten Beweggründe muten eher bescheiden an: Durch das Verbreiten negativer Ergebnisse will man Biologen und Medizinern das Wiederholen fruchtloser Versuche ersparen. Offenbar wird in den Biowissenschaften die Chance, durch Nullresultate zu überraschenden Einsichten zu gelangen, noch kaum wahrgenommen. Dabei lehrt ein Blick in die Wissenschaftsgeschichte, wie sehr insbesondere die Physik von negativen Ergebnissen profitiert hat.

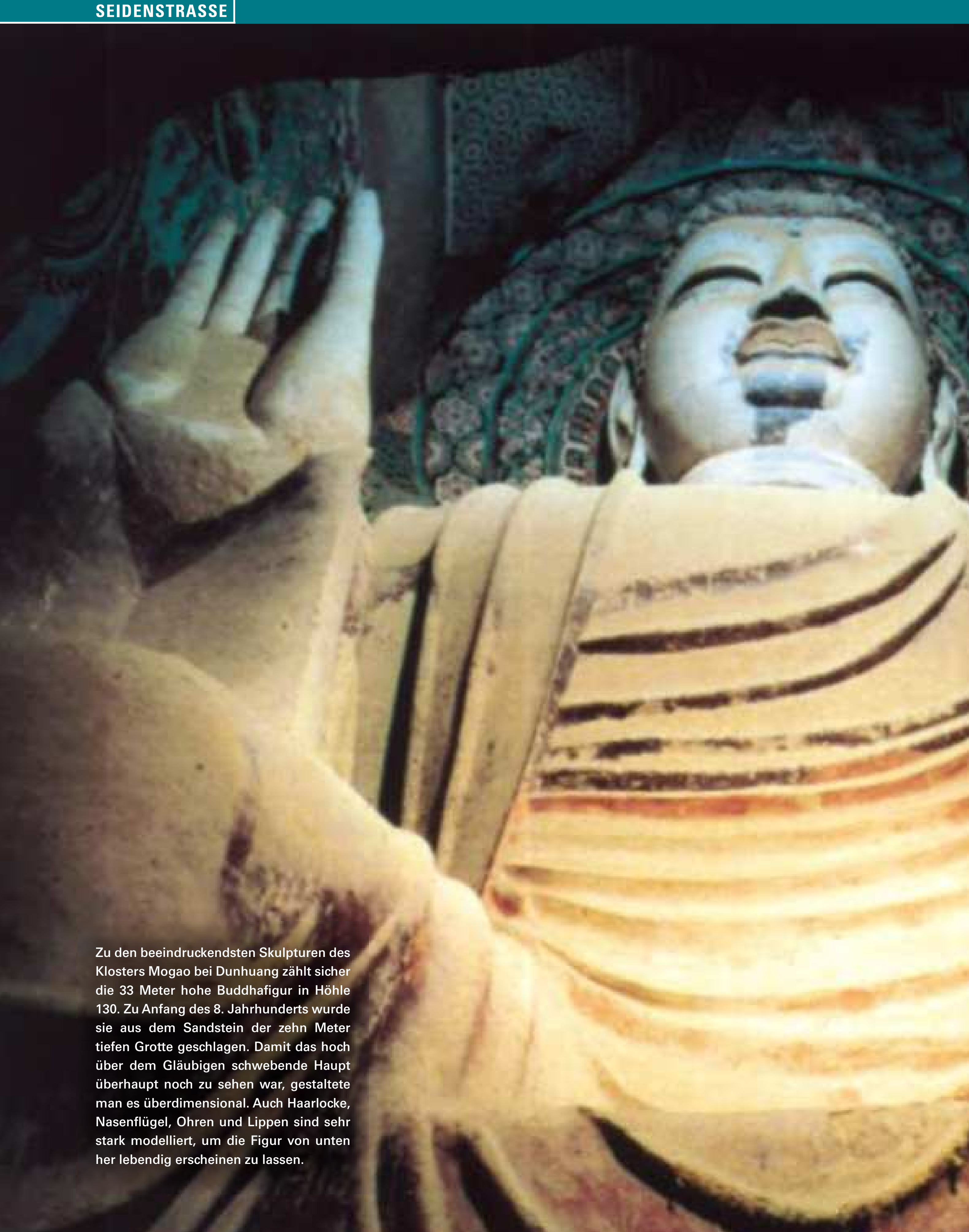
Ein klassisches Beispiel fruchtbaren Scheiterns ist der Michelson-Versuch: Ende des 19. Jahrhunderts erwies es sich als unmöglich, durch noch so feine optische Experimente die Bewegung der Erde relativ zum Äther – dem hypothetischen Trägermedium des Lichts – nachzuweisen. Auf diesem Nullresultat baute Einstein eine revolutionäre Theorie auf, deren hundertjähriges Jubiläum wir gerade feiern.

Auch Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie beruht auf einem Versuch, der nicht gelingen kann: Es ist unmöglich, im lokalen Bezugssystem den geringsten Unterschied zwischen träger und schwerer Masse festzustellen. Zu wissen, dass etwas nicht geht, kann eine Sensation sein. Schon früher zogen die drei Hauptsätze der Thermodynamik das Resümee aus dem hartnäckigen Misserfolg bestimmter Versuche, insbesondere beim Bau eines Perpetuum mobile. Auch wichtige Grundaussagen der Quantenmechanik sind negativ: Nie kann es gelingen, Ort und Impuls eines Teilchens zugleich mit beliebiger Genauigkeit zu messen. Auf einer quantenstatistischen Unmöglichkeit beruht schließlich sogar die Existenz der Welt, wie wir sie kennen: Nur weil es Teilchen mit halbzahligem Spin verboten ist, identische Zustände einzunehmen, ordnen sich die Elektronenhüllen der Atome zum Periodensystem der chemischen Elemente.

Somit gäbe es, so paradox das klingt, ohne negative Tatbestände – ohne physikalische Unmöglichkeiten – überhaupt keine positive Wirklichkeit, in welche die Wissenschaft forschend einzudringen vermag. Dennoch ist das Image von Nullresultaten schlecht. Wer eine Behauptung experimentell beweisen möchte, betrachtet das negative Ergebnis als Misserfolg. Doch wenn Forschung ausschließlich darin bestünde, vorgefasste Annahmen zu bewahrheiten, bliebe die Überraschung aus, die jede wirklich neue Erkenntnis begleitet. »Eisbären sind weiß« ist ein so gut bestätigter Satz, dass seine Verifikation durch das Vorzeigen eines weiteren weißen Eisbärs keine wissenschaftliche Großtat wäre – doch von diesem Typ sind viele Aktivitäten der »normalen« Wissenschaft: Sie erhärten Behauptungen, die im Rahmen des allgemein Erwarteten bleiben. Erst das Falsifizieren der gängigen Behauptung – gleichsam das Entdecken eines Eisbärs mit schwarzem Fell – zwingt zum Umdenken.

Das gilt nicht nur für die Physik. Die Evolutionsbiologie sammelt seit Darwins »Entstehung der Arten« immer neue Indizien für eine erstaunliche Negativaussage: Bei der Entstehung und Entfaltung der Lebensformen ist nichts im Spiel gewesen als Zufall, Selektion und unvorstellbar viel Zeit – kein Elan vital, keine morphogenetischen Felder, kein »intelligentes Design« eines Schöpfergottes. Der grandiose Negativismus von Darwins Lehre ist eines der großen naturwissenschaftlichen Wunder. Wer bei einem Spaziergang oder Zoobesuch aus dem Staunen über den Erfindungsreichtum der Natur nicht herauskommt, der bewundert eines der fruchtbarsten Negativresultate der Wissenschaft.

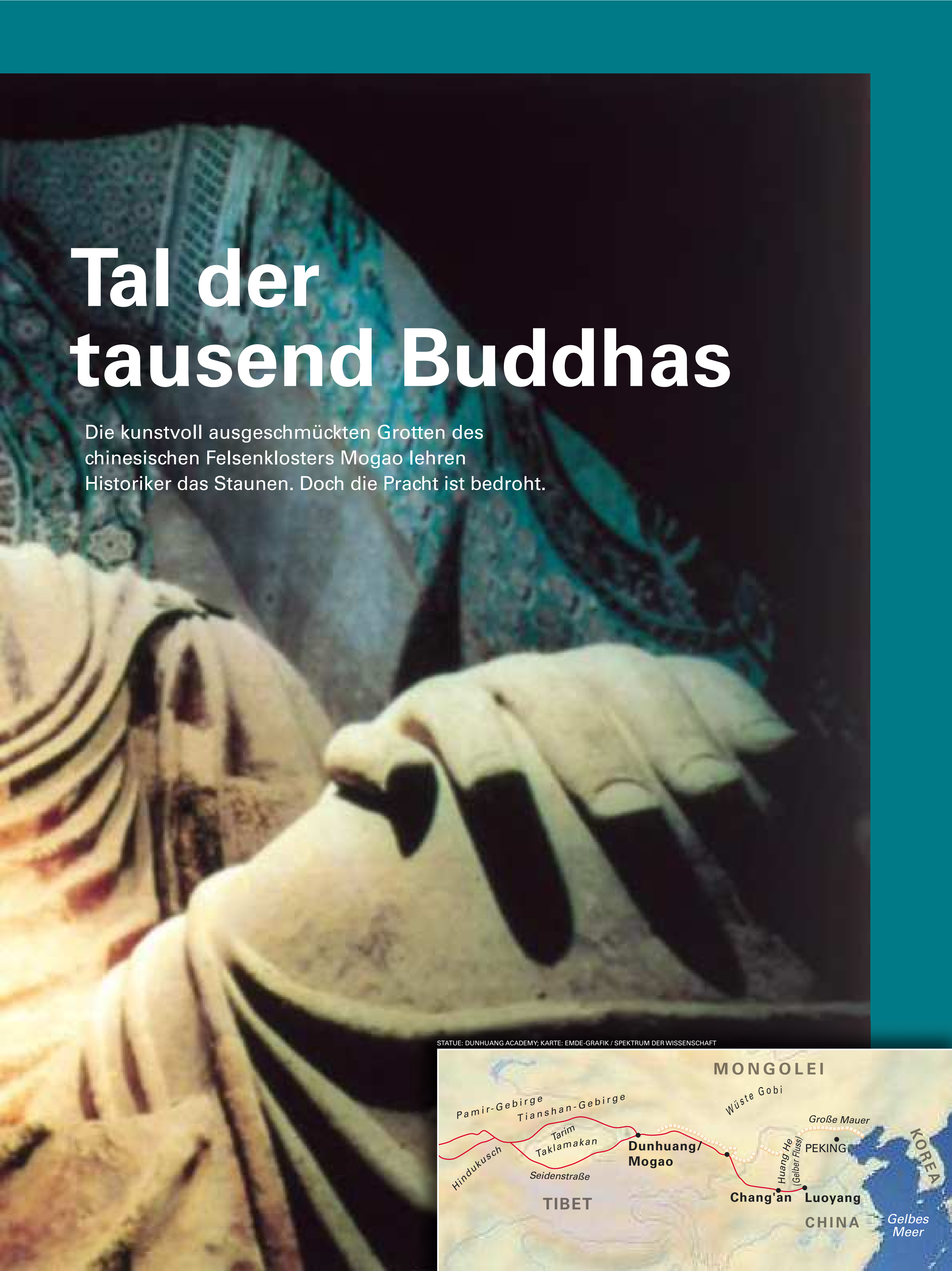




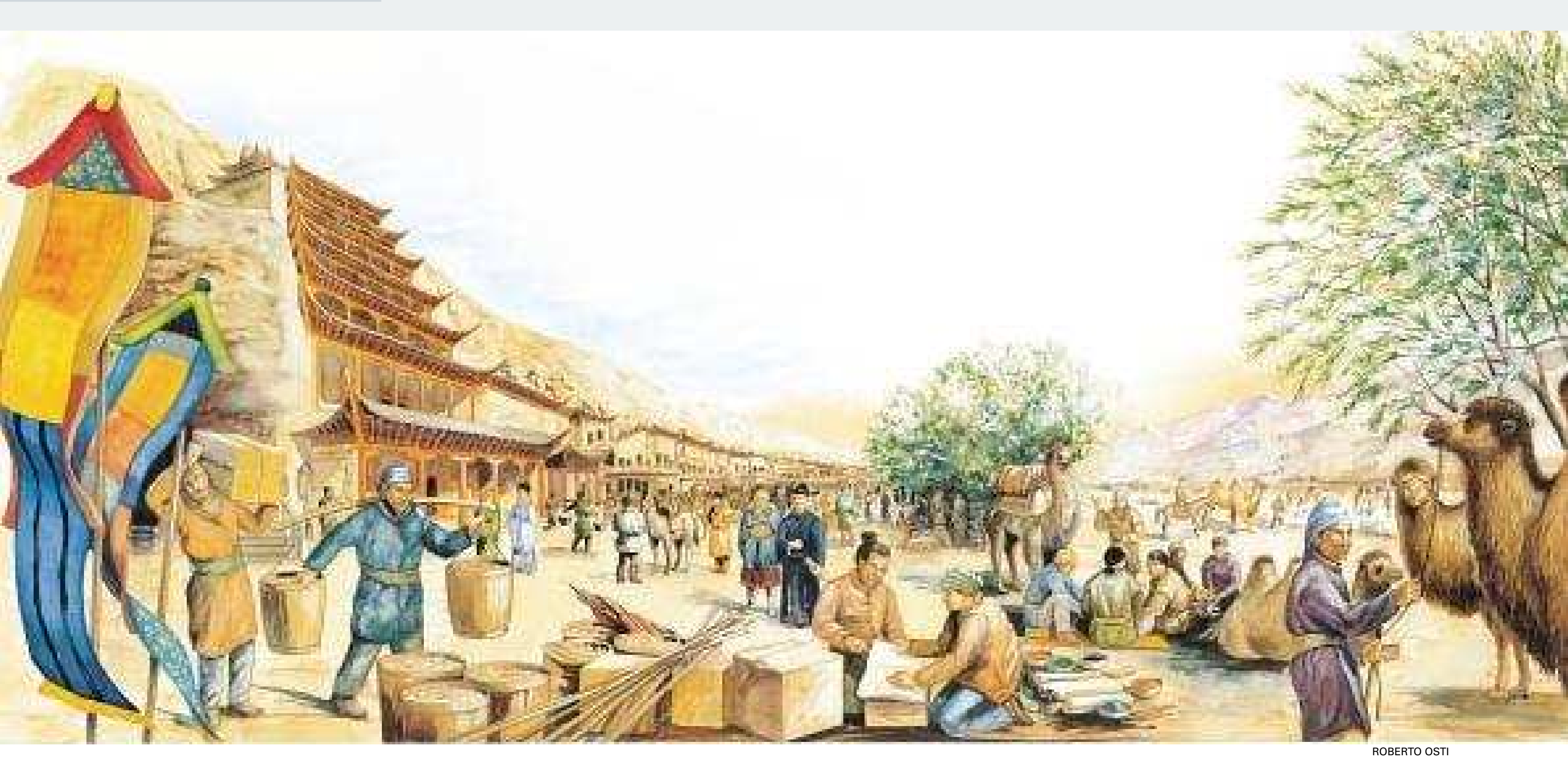
Zu den beeindruckendsten Skulpturen des Klosters Mogao bei Dunhuang zählt sicher die 33 Meter hohe Buddhafigur in Höhle 130. Zu Anfang des 8. Jahrhunderts wurde sie aus dem Sandstein der zehn Meter tiefen Grotte geschlagen. Damit das hoch über dem Gläubigen schwebende Haupt überhaupt noch zu sehen war, gestaltete man es überdimensional. Auch Haarlocke, Nasenflügel, Ohren und Lippen sind sehr stark modelliert, um die Figur von unten her lebendig erscheinen zu lassen.

Tal der tausend Buddhas

Die kunstvoll ausgeschmückten Grotten des chinesischen Felsenklosters Mogao lehren Historiker das Staunen. Doch die Pracht ist bedroht.



STATUE: DUNHUANG ACADEMY; KARTE: EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



ROBERTO OSTI

Von Lerke von Saalfeld

Wer dem Verlauf der viel gerühmten Seidenstraße von den chinesischen Zentralprovinzen Richtung Westen folgt, stößt im äußersten Zipfel der Wüste Gobi auf die Stadt Dunhuang. Wo Karawanen ihre Wasser- und Lebensmittelvorräte auffüllten, bevor sie die lebensgefährliche Route durch die Wüste Taklamakan in Angriff nahmen, blühte jahrhundertelang der Handel. Etwa 25 Kilometer davon entfernt entstand ein Zentrum ganz anderer Art an der berühmten Handelsroute: Nicht weniger als tausend Grotten haben fromme Mönche in der Flussoase Mogao in den Fels geschlagen, die ersten im 4. Jahrhundert n. Chr., die letzten rund tausend Jahre später. Heute sind davon noch 492 erhalten. Diese Klosteranlage gehört für mich zu den wunderbarsten Schätzen, die in die Liste des Weltkulturerbes aufgenommen wurden.

Denn noch heute sind die Höhlen von oben bis unten kunstvoll mit buddhistischen Motiven bemalt, insgesamt eine Fläche von 45 000 Quadratmetern. Überdies schmücken etwa dreitausend Skulpturen die Klausen und Betstätten, manche nur drei Zentimeter, andere dreißig Meter hoch. Fan Jinshi, die Direktorin der Dunhuang-Akademie, wird nicht müde zu betonen, dass dieser Ort einzigartig ist: »Wir tragen eine große Verpflichtung kommenden Generationen gegenüber.« Ihr gut ausgestattetes Forschungsinstitut, gegründet 1943, restauriert und pflegt die Kunstwerke – seit fünfzehn Jahren gemeinsam mit dem Getty Conservation Institute (GCI) aus Los Angeles. Während andernorts in der Welt großartige Zeugnisse der Vergangenheit roh zerstört werden oder dem Verfall preisgegeben sind, gelten die Mogao-Grotten international als Vorbild einer gedeihlichen Ost-West-Kooperation auf dem Gebiet des Kunsterhalts.

Schlamm für die Höhlengemälde

So beendet das Team derzeit eines der ehrgeizigsten Projekte: die Musterrestaurierung der Höhle 85, die dann nach acht Jahren Arbeit wieder öffentlich zugänglich ist. »Es ist eine besondere Grotte«, betont Jeanne Marie Teutonico, die Direktorin des GCI. »Ihre Wandmalereien sind außergewöhnlich, aber das galt auch für die anfallenden Probleme!« Denn etwa ein Drittel der bemalten Oberfläche wies Schäden auf: Farbe blätterte ab, der Putz löste sich vom Felsen (siehe Bild S. 33), Farbschichten waren feucht, Salze kristallisierten großflächig aus, mitunter riss das Gestein. Besonders schwer war es, schon abgelöste Farbschichten wieder mit dem Felsuntergrund zu verbinden, bevor sie abblätterten. Zwei Jahre experimentierten die Restauratoren, um die richtige Füllmasse zu finden – nicht zu leicht und nicht zu schwer. Achtzig verschiedene Mischungen wurden getestet, die optimale Rezeptur war zugleich eine Hommage an die Künstler der Vergangenheit: Schlamm aus dem nahe gelegenen Flussbett lieferte die Basis – er diente bereits vor über tausend Jahren als Grundierung, um die Malschicht mit dem Felsen zu verbinden.

Die Höhle wurde 866 n. Chr., während der Herrschaft der Tang-Dynastie, in den Fels geschlagen, bemalt und mit Skulpturen ausgestattet. Die wohlhabende Familie eines lokalen Aristokraten namens Zhai Farong ließ sie anlegen, dreizehn Meter hoch und mit einer quadratischen Grundfläche mit jeweils fast elf Meter Seitenlänge. Dokumente in der Bibliothek des Höhlenklosters belegen die Urheberschaft, im Eingangsbereich des Grottentempels haben sich die Stifter in lebensgroßen Porträts verewigt.

Die Bilderwelt des Buddhismus, seine Legenden und Alltagsgeschichten verwandeln die Höhle in einen lebendigen Kosmos. Bei einem Besuch der Mogao-Grotten im vergangenen Jahr anlässlich einer internationalen Restauratoren-Konferenz hatte ich Gelegenheit, den Fortschritt der Arbeiten in Höhle 85 zu bewundern. Besonders faszinierte mich, dass die Künstler des chinesischen Altertums erhaben Göttliches direkt neben Szenen aus dem täglichen Leben platzier-

◀ Karawanen bot die Flussoase Mogao an der Seidenstraße nicht nur Wasser, sondern auch geistige Labsal: In den Fels schlugen Mönche im Lauf von Jahrhunderten fast tausend Höhlen, die sie mit buddhistischen Skulpturen und Wandmalereien kunstvoll ausschmückten. Die neunstöckige Pagode (links) aus der Blütezeit der Tang-Dynasie (705–780) bildet noch heute eine der touristischen Hauptattraktionen, verbirgt sich hinter ihren Mauern doch eine Monumentalstatue des Buddha Maitreya.

ten. Man sieht erleuchtete Wesen, so genannte Bodhisattvas, die Buddha mit erhobenen Händen anbeten, und daneben wie selbstverständlich die Darstellung eines Schlachters (siehe Bild S. 36) bei der Arbeit oder ein verliebtes Paar, das dem gemeinsamen Lautenspiel lauscht.

Diese Grotte wird nicht nur Fachleute, sondern vor allem auch Touristen begeistern. Bis zu 350 000 Besucher kommen jeden Sommer, doch es sind nie mehr als dreißig Grotten zugänglich, um die Schäden gering zu halten. Viele Chinesen begreifen den Ort durchaus als religiöse Stätte und deponieren Geldscheine und Wunschzettel zu Füßen der Buddha-Statuen. In ähnlicher Weise erbat vor Jahrhunderten den Segen des Erleuchteten, wer seinen Weg auf der Seidenstraße um die Taklamakan herum fortsetzte. Und wer glücklich aus dem Westen heimkehrte, wird den Vertretern des buddhistischen Pantheons für ihren Schutz mit Weihegeschenken und Gebeten gedankt haben. Schließlich war das Kloster, dreitausend Kilometer westlich von Peking gelegen, eine der letzten Stätten zivilisierten Lebens. Dort gründeten Mönche im Flusstal des Dachuan auf einer Gesamtlänge von anderthalb Kilometern ihr Höhlenkloster, das sie auf fünf übereinander liegenden Ebenen in die schroff abfallende Felswand schlugen. Schon von Ferne lockte – und lockt auch heute noch – eine vor den Stein gesetzte neunstöckige Pagode, die die Felswand majestätisch überragt.

Die noch erhaltenen Höhlen sind streng symmetrisch angelegt, quadratisch oder rechteckig. Meist führt eine Vorhalle in den eigentlichen Kultraum, in dessen Mitte Buddha und die heiligen Bodhisattvas aufgestellt sind, mitunter von skurrilen Wächterfiguren umgerahmt. Decken und Fußböden sind mit bemalten Ziegeln belegt und oft mit Lotosblüten als Zeichen der Reinheit ausgeschmückt. Die Wände zieren Wandmalereien, die dank der trockenen Wüstenluft noch heute frische und intensiv leuchten. Vergleichbare großflächige Seccomalereien aus dieser frühen Zeit lassen sich in Europa nicht finden (im Gegensatz zum Fresko werden die Farben beim Secco auf den trockenen Putz aufgebracht).

Stilimport aus dem Westen

Tausend Jahre Kunst- und Kulturgeschichte, tausend Jahre buddhistische Malerei und Bildhauerkunst sind in den Grotten wie an keinem Ort der Welt versammelt. Dem Betrachter erschließen die Werke nicht nur die Glaubenswelt ihrer Zeit. So wirkten dank internationaler Handelsbeziehungen im 4. und 5. Jahrhundert indische, persische, byzantinische und sogar griechische Einflüsse. Manche Bodhisattva-Figuren ähneln in der Körperhaltung griechischen Statuen, ihre Nasen sind ebenfalls griechisch geformt, die Augen aber beinahe asiatisch ▷

Die geheime Bibliothek

Ein Luftzug brachte 50 000 Dokumente aus dem chinesischen Altertum ans Licht.

Heute ist die Höhle 17 ein unscheinbarer Raum, nichts erinnert an den sensationellen Fund im Jahr 1900. Ein taoistischer Mönch namens Wang lebte in den Grotten. Eines Tages löschte ein Windhauch in der Höhle 16 sein Kerzenlicht. Doch wo sollte dieser hergekommen sein? Wang klopfte die Wände ab und entdeckte einen Hohlraum, dahinter eine ganze Bibliothek mit Schriften. Heute wissen wir, dass Mönche im Jahr 1036 die Höhle zumauerten, um ihren Schatz vor den heranstürmenden Mongolen zu verbergen: Schriftrollen, Seidenmalereien, Kultgegenstände, Sprachdokumente von ethnischen Minderheiten und Rechnungsbücher vom Handel an der Seidenstraße, Sanskritschriften und sogar hebräische Texte, Notenhandschriften, astrologische Berechnungen und andere wissenschaftliche Texte über Medizin, Geografie und Mathematik. Diese Bibliothek enthielt das Gesamtwissen von Wissenschaft und Kultur vom 4. bis zum 11. Jahrhundert, vermutlich insgesamt etwa 50 000 Dokumente.

Zunächst war die vermauerte Bibliothek vor Räuberhänden sicher. Aber Sandstürme und Erdbeben taten das ihrige, um die Höhlen allmählich verschwinden zu lassen. Der Mönch berichtete nun pflichtschuldig dem Kaiserhof von seinem Fund und bat, ihn abzutransportieren. In Peking wurde der Wert der Sammlung aber nicht erkannt, man zeigte kein Interesse und befahl dem Mönch, weiter darauf aufzupassen. Schneller und gewitzter reagierten europäische Forscher, die sich zu dieser Zeit in China aufhielten. Eilends kamen sie zu den Mogao-Grotten und beschwatzten den Entdecker so lange, bis er ihnen Stück für Stück die Kostbarkeiten »verkaufte«. Nur der britische Archäologe Sir Marc Aurel Stein zog mit einer Karawane von 40 Kamelen, beladen mit Kisten, davon. Seine Beute ist im Besitz des Britischen Museums in London. Höchstens ein Viertel der Kunst- und Kulturschätze verblieb in China.

Für den früheren Direktor der Dunhuang-Akademie, Duan Wenjie, waren diese von kolonialem Denken geprägten Forscher nur Räuber und Abenteurer, gar »die Teufel der Seidenstraße«. Eine neue Generation junger Wissenschaftler und Bibliothekare an der British Library hat nun ein höchst verdienstvolles Werk begonnen: Sie lässt alle Dokumente der Höhle 17, wo auch immer sie in der Welt in Magazinen und Depots stecken, fotografieren und stellt sie ins Internet, sodass zumindest auf digitalem Weg die alte Bibliothek virtuell wiederersteht und der chinesischen Forschung zugänglich wird.

geschnitten. Doch verschmolzen die Künstler all diese Formensprachen zu einem eigenen Stil. Zu den herausragenden Skulpturen der frühen Zeit gehört eine Buddhafigur (siehe Bild S. 35), deren geheimnisvolles Lächeln an eines der bedeutendsten Werke der europäischen Renaissance erinnert: Leonardo da Vincis »Mona Lisa« . Mit einem kleinen Unterschied, so die Leiterin der Dunhuang-Akademie: »Unsere Mona Lisa ist tausend Jahre älter.«

Die frühen Wandmalereien ähneln ein wenig Comicstrips: Oben rechts beginnend, unten links endend, erzählen sie in drei untereinander angeordneten Reihen Episoden aus Buddhas Leben. Die einzelnen Bilder sind durch Bäume oder Berge von der nächsten Szene abgegrenzt, wobei Menschen überdimensional erscheinen und die Natur sich auf ein Miniformat zurückzieht. Ein beliebter Gegenstand der Darstellungen ist auch die als Jataka bezeichnete Sammlung von Legenden zu früheren Existenzen des Buddhas – auch er war dem Rad der Wiedergeburt unterworfen, bis er Erleuchtung erlangte. Dazu gehört die Geschichte vom Prinzen Sudana, der beim Ausreiten im Wald eine fast verhungerte Tigerin mit ihren Jungen antrifft (siehe Bild S. 37). Während seine Brüder zurückreiten, um Hilfe zu holen, ist Prinz Sudana so von Mitleid erfüllt, dass er sich nackt vor die Füße der Tigerin wirft, damit sie ihn fresse und wieder ▷

Buddhas Tänzerinnen

Blüten streuend und musizierend zieren Apsaras die mythologischen Bilder.

Weibliche göttliche Wesen, die zwischen Himmel und Erde schweben, gehören zum beeindruckenden Inventar der Wandmalereien der Mogao-Grotten. Diese so genannten Apsaras repräsentierten Heiterkeit und Lebensfreude; sie symbolisieren die unbeschwerten Vorstellungen einer Religion, die offen gegenüber anderen Glaubenssystemen war. Entlehnt sind sie nämlich der hinduistischen Mythologie; das Wort stammt aus dem Sanskrit und bedeutet »Wasserwandlerinnen«. Bekannt sind Apsaras vor allem aus den Steinreliefs von Angkor Wat in Kambodscha, wo sie als himmlische Tänzerinnen den Tempel zieren. In den Mogao-Grotten tauchen sie bereits in den ältesten Höhlen aus dem 5. Jahrhundert auf. Besonders dekorativ sind die Apsaras der Tang-Zeit, aber auch noch im 10./11. Jahrhundert wurden Höhlen mit ihnen ausgeschmückt.

Charakteristisch für diese Darstellungen ist: Die Apsaras im konfuzianischen China sind nicht nackt wie ihre indischen Vorbilder, nur ihr Oberkörper ist entblößt; ein Heiligenschein umgibt oft ihren Kopf; besonders typisch aber ist ihre schwungvolle Körperhaltung, sie fliegen durch die Lüfte und in einem Meer von Blumen; mit graziöser Leichtigkeit überwinden sie die Schwerkraft der Erde. Blaue Schleier umflattern ihre Körper und unterstreichen die Schwerelosigkeit der Wesen. Forscher vermuten, dass die fliegenden Sanddünen der Umgebung Vorbild waren für die Gestaltung ihrer wellenförmigen Körper. Meist schwingen sie direkt unterhalb der Decke in einem Rundumfries durch die Lüfte und streuen Blüten auf den Buddha.

In Höhlen aus der Westlichen Wei-Zeit (535–556), hier Nr. 285, werden vor allem die Musikwissenschaftler aufmerksam, denn dort spielen alle Apsaras ein Instrument.



AUS: THE ART OF DUNHUANG, FOTO: SEIGO OTSUKA, JAPAN BROADCAST PUBLISHING CO. LTD. 1992

NEVILLE AGNEW, J. PAUL GETTY TRUST 1999, GETTY CONSERVATION INSTITUTE

LESLIE RAINER, J. PAUL GETTY TRUST 1999, GETTY CONSERVATION INSTITUTE

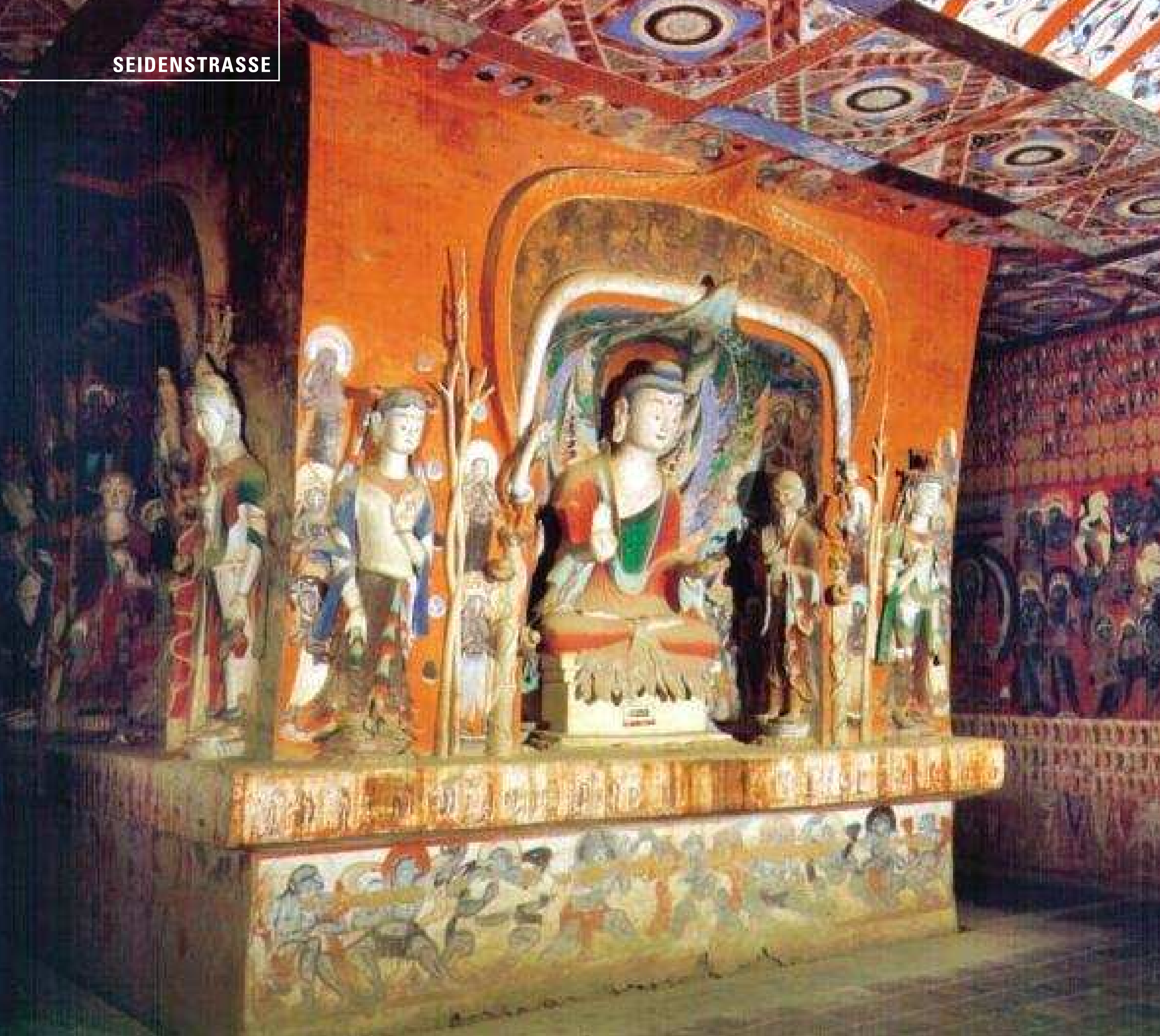


▲ Acht Jahre lang restaurierten Spezialisten der Dunhuang-Akademie und des Getty Conservation Institute (Los Angeles) die Wandmalereien der Höhle 85. Sie ist 13 Meter hoch und über und über mit buddhistischen Motiven ausgeschmückt (im Bild die Restauratoren auf der obersten Gerüstebene).

◀ Abblätternde Farb- und Putzschichten (links) stellten die Restauratoren in der mehr als 1100 Jahre alten Grotte vor immer neue Aufgaben. Eine eigens entwickelte Mörtelmischung wurde hinter die Malereien gespritzt (rechts) und während der Trocknung vorsichtig angepresst.

LORI WONG, J. PAUL GETTY TRUST 2004, GETTY CONSERVATION INSTITUTE





DUNHUANG ACADEMY 1999, FOTO: WU JIAN

genügend Kraft erhalte, ihre Jungen zu ernähren. Nicht minder beliebt waren in der Frühzeit aber auch schon die Szenen aus dem Alltag: Bauern bei der Ernte, Jäger bei der Verfolgung des Wilds, Überfälle auf Handelskarawanen.

In der Blütezeit des chinesischen Buddhismus, in der Tang-Zeit zwischen dem 7. und 10. Jahrhundert, entstanden die meisten Grotten, von ihnen sind noch 213 erhalten. Das Selbstbewusstsein des Kaiserreichs prägt nun die Bildersprache, denn die Figuren wirken chinesisch: Sie tragen üppige Gewänder, denn Nacktheit war in jener Zeit verpönt, die Gesichter wurden ovaler, die Bärte dünner, die Augen schlitzförmiger. Statt einzelner kleiner Szenen bevorzugten die Künstler jener Zeit Großgemälde, die verschiedene Perspektiven boten – Frontal- und Seitenansicht sowie Vogelperspektive.

Aus der Ruhe der Seele

In der Stilistik der Malerei gewinnt die rhythmische, großzügig schwungvolle Pinselführung an Bedeutung, wie sie auch aus der Kalligrafie chinesischer Lyriker und Philosophen bekannt ist. Figuren und Landschaften wurden mit dunklen Konturstrichen bewegter dargestellt. Zugleich wirken die Farben vor allem in der Landschaftsmalerei duftiger und leichter. Die Maler versuchten, ihre Werke aus der »Ruhe der Seele« zu schöpfen. Motivisch verschwindet der lehrhafte Charakter der früheren Höhlenmalereien, denn die gelassenere Weltsicht des Amitabha-Buddhismus erleichtert den Gläubigen das Leben. Der Gläubige musste nicht mehr aufopferungsvoll die verschiedenen Läuterungsstufen bis zum Nirwana durchleben und durchleiden; allein schon durch den Glauben an den gegenwärtigen Buddha Amitabha wurde ihm ein Paradies versprochen, das »Westliche Paradies« (siehe S. 36).

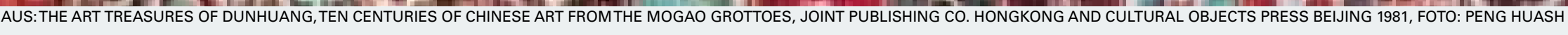
In den Großgemälden der Mogao-Grotten jener Zeit breiten sich dementsprechend himmlische Palastlandschaften vor dem Auge des Betrachters aus. ▷



Der Kultraum von Höhle 428 (Zhou-Dynastie; 557–580) zeigt den typischen Aufbau: In der Mitte thront Buddha in einem Schrein, umgeben von ihn verehrenden erleuchteten Wesen, den Bodhisattvas; an den Wänden prangen Darstellungen mythologischer Szenen, eingerahmt von Buddha-Gesichtern.

Was dem europäischen Kunstkenner die »Mona Lisa«, ist chinesischen Wissenschaftlern dieser auf geheimnisvolle Weise lächelnde Buddha in Höhle 259.

AUS: THE ART TREASURES OF DUNHUANG, TEN CENTURIES OF CHINESE ART FROM THE MOGAO GROTTOES, JOINT PUBLISHING CO. HONGKONG AND CULTURAL OBJECTS PRESS BEIJING 1981, FOTO: PENG HUASHI



AUS: THE ART TREASURES OF DUNHUANG, TEN CENTURIES OF CHINESE ART FROM THE MOGAO GROTTOES, JOINT PUBLISHING CO. HONGKONG AND CULTURAL OBJECTS PRESS BEIJING 1981, FOTO: PENG HUASH



NEVILLE AGNEW, J. PAUL GETTY TRUST 1998, GETTY CONSERVATION INSTITUTE

▲ Das »Westliche Paradies« in der Höhle 217: Kunstvolle Bauten schwimmen wie futuristische Gebilde in einem System von Wasserkanälen, die von Brücken überspannt sind. Nicht nur nahe der Wüste musste eine solche Szene wie ein irdisches Paradies wirken.

◀ Bei aller Religiosität fehlten doch auch alltägliche Szenen nicht in der Bildsprache der Mönche. Hier die Darstellung eines Metzgers bei der Arbeit in Höhle 85



AUS: THE ART TREASURES OF DUNHUANG, TEN CENTURIES OF CHINESE ART FROM THE MOGAO GROTTOES, JOINT PUBLISHING CO. HONGKONG AND CULTURAL OBJECTS PRESS BEIJING 1981, FOTO: PENG HUASHI

▷ Orchester und Tanzgruppen beleben die Szenerie, in blumenreichen Gärten tummelt sich die Hofgesellschaft, exotische Vögel schwirren durch die Luft.

Für Ethnologen sind diese Darstellungen eine wahre Fundgrube: Kostüme und Haartrachten, Musikinstrumente und Tanzformationen, Häuser, Brücken und Gassen sind Zeugnisse dieser frühen Kultur; Darstellungen von Abgesandten ethnischer Minderheiten geben Kunde von der Vielfalt der Völker im Kaiserreich. Experten vermuten, dass diese Vision vom »Westlichen Paradieses« durch die am anderen Ende der Seidenstraße gelegene Stadt Venedig inspiriert war (siehe nebenstehendes Bild). Die Berichte vom unermesslichen Reichtum jener fernen Handelsmetropole mit ihrem raffinierten Kanalsystem war bis nach China gedrungen und hatte die Fantasie der Künstler angeregt.

Schutz vor dem Sand der Wüste

Im 12. Jahrhundert drang der Islam allmählich vom Westen her in China ein. Das buddhistische Heiligtum bei Dunhuang provozierte den religiösen Fanatismus der neuen Religionsstifter. In einem beispiellosen Bildersturm kratzten sie Buddhas die Augen aus oder zerstörten ihr Antlitz vollständig. Im 20. Jahrhundert dann flüchteten Teile der im russischen Bürgerkrieg unterlegenen Weißen Armee in den Nordwesten Chinas. In den Mogao-Grotten suchten sie Unterschlupf. Noch heute sind manche Höhlen von den Rauchspuren ihrer Feuer gezeichnet. Und wie erging es dem Höhlenkloster fünfzig Jahre später während der Kulturrevolution? Man mag es kaum glauben, aber die Roten Garden verschonten das Heiligtum, wie viele andere Kultstätten in China auch. Es heißt, Ministerpräsident Zhou Enlai habe persönlich befohlen, die Mogao-Höhlen nicht anzurühren.

Während in Europa der Zweite Weltkrieg tobte und China von Japan besetzt war, wurde die Dunhuang-Akademie gegründet, um die Höhlen endlich unter staatlichen Schutz zu stellen und mit einer systematischen Konservierung und Restaurierung zu beginnen. 1987 erhielten die Grotten dann ihre Anerkennung als Weltkulturerbe, zwei Jahre später nahm das Getty-Institut die Arbeit auf. Eine der ersten Aktionen war, die permanente Bedrohung durch den Wüstensand einzudämmen.

Pro Jahr verschütteten etwa 3000 Kubikmeter Sand die Höhlen, das sind etwa zehn Lastwagen pro Tag. Dagegen wurde auf der Höhe der Felsklippe ein durchlässiger Textilzaun errichtet, der die Windgeschwindigkeit bremst und damit Sandverwehungen um sechzig Prozent reduziert. Zur gleichen Zeit versahen japanische Experten alle Höhlen mit luftdurchlässigen Türen, die ebenfalls noch heute verhindern, dass Sand ins Innere gelangt. Den gleichen Zweck erfüllen Anpflanzungen und ein Raster aus Stroh und Geäst in der Wüste, sodass inzwischen neunzig Prozent der früheren Menge von Sandmenge abgefangen werden.

Doch durch den Besucherstrom steigt die Temperatur in manchen Höhlen mittlerweile um vier Grad Celsius und in der Sommersaison kommen dort bis zu sieben Liter Wasser pro Tag durch Transpiration hinzu. Um die Grotten vor den Folgen des Tourismus zu schützen, wurden besonders kostbare naturgetreu in einer Ausstellungshalle nachgebaut. Das Kopieren alter Kunst hat in China eine lange Tradition. Das Ergebnis ist verblüffend, sowohl in der Farbgebung wie im Schwung der Pinselführung sind die Kopien von einer faszinierenden Qualität, sodass man fast vergessen kann, nur das Abbild zu erblicken. Doch eben nur fast. Wie in Zukunft die Probleme des wachsenden Tourismus gelöst werden, bleibt dennoch offen. Freilich stehen die chinesischen Denkmalschützer mit diesen Herausforderungen nicht allein, weltweit kennt man die Probleme. In internationaler Kooperation hofft man sie zu lösen.

▲ Auch Buddha musste mehrere Wiedergeburten erleben, bis er Erleuchtung erlangte. Doch der Legende nach zeichnete er sich schon früh durch besonderes Mitgefühl aus. So opferte sich die als Prinz Sudana bezeichnete Inkarnation einer fast verhungerten Tigerin, damit sie ihn verspeise und genug Kraft schöpfe, um wieder ihre Jungen säugen zu können (Höhle 428).

Die Tausend-Buddha-Grotten von Dunhuang repräsentieren einen Schatz von höchstem Wert. Vor 1500 Jahren, als erste Zivilisation und Kultur nur von außen in die Mitte Europas durch die Römer importiert wurden, entstand im Herzen Asiens ein Zentrum von einzigartiger künstlerischer Poesie. China, das sich über Jahrhunderte von der Außenwelt abgeschlossen hat, ist offener geworden; in Dunhuang hat sich eine beispielhafte internationale Kooperation entwickelt, die das Wort Globalisierung mit einem guten Klang erfüllt. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Lerke von Saalfeld lebt als Kulturjournalistin in Stuttgart und Berlin und arbeitet hauptsächlich für Fernsehen und Rundfunk. Seit den 1960er Jahren bereist sie die kulturellen Stätten Asiens vom Taj Mahal über Angkor Wat bis zum Borobudur.

Loulan – Königreich der Wüste. Von Erling Hoh in: Abenteuer Archäologie 4/2004, S. 60

Dunhuang. Buddhistische Kunst an der Seidenstraße. Von Roderick Whitfield (Text) und Seigo Otsuka (Fotografie). Hirmer-Verlag, München 1995

Die Höhlentempel von Dunhuang. Ein Jahrtausend chinesischer Kunst. Vom Dunhuang Institute of Cultural Relics (Hg.). Klett-Cotta, Stuttgart 1982



Der Urknall – Mythos und Wahrheit

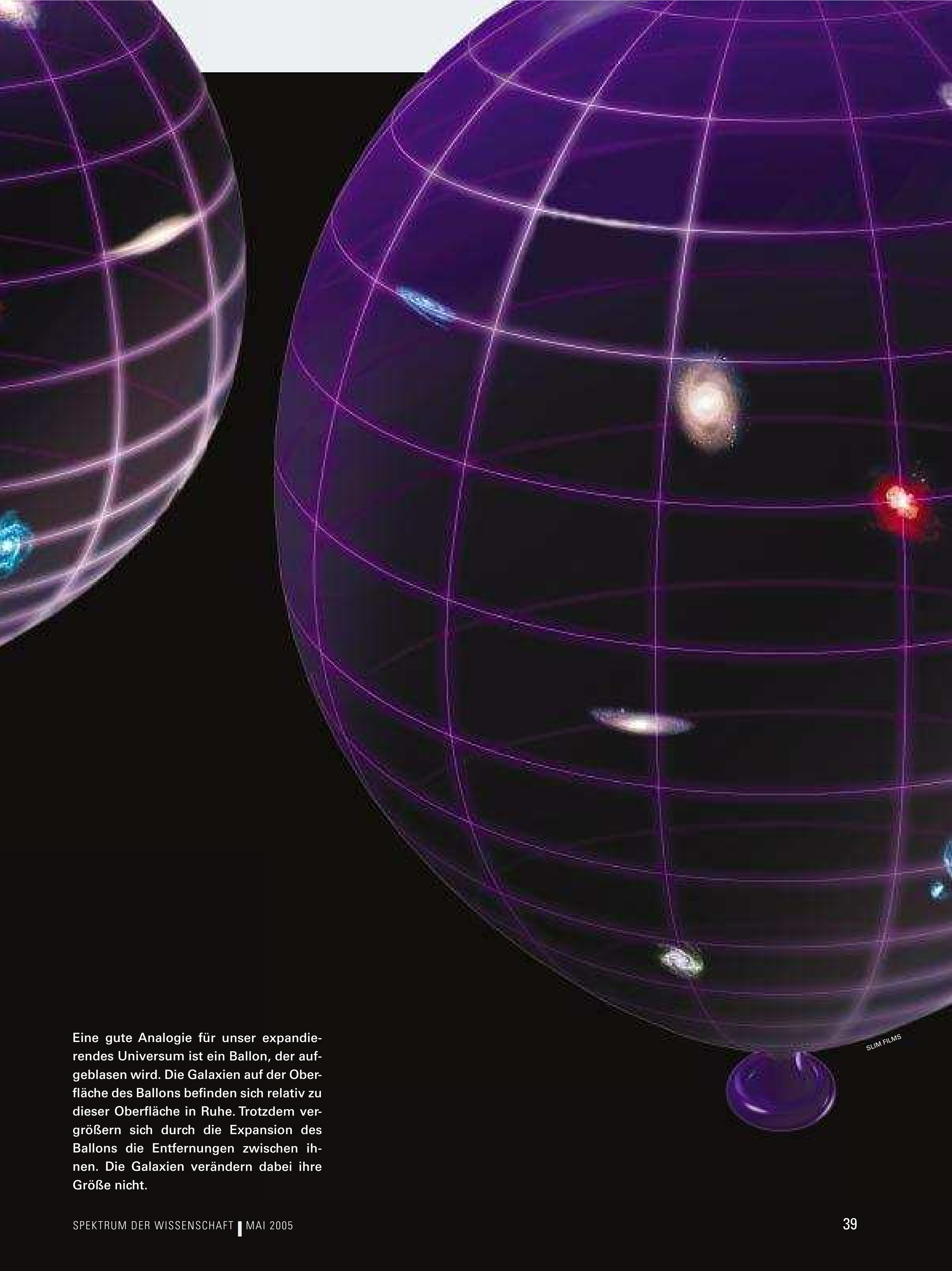
Verwirrt von der Expansion des Universums? Damit sind Sie nicht allein – selbst Astronomen verstehen den Urknall nicht immer richtig.

Von Charles H. Lineweaver und Tamara M. Davis

Dass unser Universum expandiert, ist die vielleicht wichtigste Erkenntnis, die wir je über unseren Ursprung gewonnen haben. Ohne diese uranfängliche Ausdehnung des Alls könnten Sie diesen Artikel nicht lesen. Es würden überhaupt keine Menschen existieren. Ja, es gäbe nicht einmal Moleküle, aus denen sich Lebewesen entwickeln könnten, und keine erdähnlichen Planeten, auf denen Leben entstehen könnte. Alle Strukturen im Kosmos – Galaxien, Sterne, Planeten und so hochkomplexe Dinge wie Artikel in Spektrum der Wissenschaft – konnten sich nur herausbilden, weil sich das Universum nach dem heißen Urknall ausdehnte und abkühlte.

Es ist inzwischen vierzig Jahre her, dass Wissenschaftler eindeutige Belege für die Expansion des Universums entdeckten: die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, sozusagen das matte Nachglimmen des unvorstellbar heißen und dichten Anfangszustands. Seitdem bilden Expansion und Abkühlung des Universums das Grundkonzept aller kosmologischen Forschungsarbeiten – ähnlich wie die Darwin'sche Evolutionstheorie in der Biologie. Jede der beiden Theorien liefert in ihrem jeweiligen Fachgebiet den Kontext, in dem sich einfache Strukturen herausbilden und im Laufe ihrer Entwicklung immer komplexer werden. Ohne Evolution gäbe es nicht die moderne Biologie und ohne Expansion nicht die moderne Kosmologie.

Seltsamerweise ähneln sich beide Konzepte noch in anderer Hinsicht: Die ▷



Eine gute Analogie für unser expandierendes Universum ist ein Ballon, der aufgeblasen wird. Die Galaxien auf der Oberfläche des Ballons befinden sich relativ zu dieser Oberfläche in Ruhe. Trotzdem vergrößern sich durch die Expansion des Ballons die Entfernungen zwischen ihnen. Die Galaxien verändern dabei ihre Größe nicht.

▷ meisten Wissenschaftler glauben, sie verstanden zu haben, doch nur wenige stimmen darin überein, was sie wirklich bedeuten. Anderthalb Jahrhunderte nach dem Erscheinen von Charles Darwins Werk »Vom Ursprung der Arten« bestreiten die Biologen zwar nicht mehr den Darwinismus an sich, diskutieren aber noch immer über seinen Ablauf und seine Implikationen – wohingegen ein großer Teil der Öffentlichkeit noch in vordarwinscher Ratlosigkeit verharrt. Ähnlich machen sich viele Menschen noch 75 Jahre nach ihrer anfänglichen Entdeckung durch den US-Astronomen Edwin Hubble falsche Vorstellungen von der Expansion des Universums.

Selbst Kosmologen, die wesentliche Beiträge zu diesem Ideengebäude geliefert haben, tun sich gelegentlich damit schwer. Und manche fehlerhafte oder irreführende Aussage zur Expansion des Universums pflanzt sich über astronomische Lehrbücher und populärwissenschaftliche Darstellungen fort. Das ist umso gravierender, als die Expansion die Grundlage des Urknallmodells darstellt. So betörend einfach die Idee ist – aber was genau bedeutet es, wenn man sagt, das Universum expandiere? Wohin expandiert es? Dehnt sich etwa auch die Erde aus? Um die Verwirrung komplett zu machen, scheint sich die Expansion zu beschleunigen – ein Vorgang, der unsere Vorstellungskraft sprengt.

Wie Ameisen auf einem Ballon

Wenn etwas expandiert, so wird es nach allgemeinem Verständnis größer, indem es sich in den ihn umgebenden Raum hinein ausdehnt – gleich, ob es sich um einen verstauchten Knöchel, das Römische Imperium oder eine explodierende Bombe handelt. All diese Dinge weisen ein Zentrum und Begrenzungen auf. Außerhalb ihrer Begrenzungen gibt es Raum, in den hinein sie sich ausdehnen können. Das Universum hingegen scheint weder Mittelpunkt noch Begrenzungen zu haben – und auch kein Außerhalb. Wie also kann es expandieren?

Eine gute Analogie ist ein Ballon, der aufgeblasen wird. Angenommen, wir wären Ameisen, die auf der Oberfläche dieses Ballons leben. Unsere Welt ist dann zweidimensional: Wir kennen nur rechts, links, vorwärts und rückwärts – aber wir haben keine Vorstellung von »oben« und »unten«. Irgendwann bemerken wir, dass der Weg zum Melken unserer Blattläuse länger wird: Am ersten Tag dauert er fünf Minuten, am nächsten sechs, dann sieben und so weiter. Auch der Weg zu anderen vertrauten Orten wird von Tag zu Tag länger. Wir sind sicher, dass wir uns nicht langsamer bewegen als früher und dass sich die Blattläuse nicht systematisch von uns entfernen.

Das ist ein wichtiger Punkt: Die Entfernung zu den Blattläusen wächst an, obwohl sich diese nicht bewegen. Sie stehen einfach herum, sie ruhen in Bezug auf das Gummi des Ballons. Trotzdem wächst der Abstand von uns zu ihnen und zwischen ihnen an. Aus den Beobachtungen können wir also den Schluss ziehen, dass sich der Boden unter unseren Füßen dehnt. Das ist sehr seltsam, denn wir sind in unserer ganzen Welt herumgelaufen und haben keine Begrenzung entdeckt – und somit auch kein »Außen«, in das hinein unsere Welt expandieren könnte.

Die Expansion unseres Universums ähnelt dem Aufblasen eines Ballons. Die Abstände zu fernen Galaxien wachsen an. Die Astronomen sprechen manchmal von einer Fluchtgeschwindigkeit oder davon, dass sich die Galaxien von uns fortbewegen. Das heißt aber nicht, dass sich die Galaxien durch den Raum von uns wegbewegen würden. Sie sind keine Splitter einer großen Urknall-Granate, die auseinander fliegt. Vielmehr ist es der Raum zwischen uns und den Galaxien, der expandiert. Zwar bewegen sich die einzelnen Galaxien innerhalb ihres Haufens, dem sie angehören. Doch die Galaxienhaufen selbst befinden sich insgesamt in Ruhe. Der Begriff »in Ruhe« lässt sich dabei durchaus streng definieren. Die Hintergrundstrahlung erfüllt nämlich den gesamten Kosmos und liefert uns so ein universelles Bezugssystem, vergleichbar mit dem Gummi des Ballons. In Bezug auf dieses System können wir die Bewegung messen.

Der Urknall war überall

Der Vergleich mit dem Ballon sollte allerdings nicht überspannt werden. Denn wir betrachten den Ballon von einer außerhalb gelegenen Warte, und die Expansion seiner zweidimensionalen Gummioberfläche ist nur möglich, weil sie in einen dreidimensionalen Raum eingebettet ist. Innerhalb dieser dritten Dimension hat der Ballon einen Mittelpunkt, und seine Oberfläche dehnt sich in die umgebende Luft hinein aus, wenn er aufgeblasen wird.

Daraus könnte man nun folgern, unser dreidimensionaler Raum benötige eine vierte Dimension, in die hinein er expandiert. Aber gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein, welche die Grundlage der modernen Kosmologie bildet, ist der Raum selbst dynamisch: Er kann also expandieren, schrumpfen und sich krümmen – ohne in einen höher dimensionalen Raum eingebettet zu sein.

In diesem Sinn ist das Universum in sich abgeschlossen. Es braucht kein Zentrum, von dem aus es expandiert, und keinen leeren Raum außerhalb (was immer das wäre), in den es hineindrängt. Wenn es sich ausdehnt, okkupiert es keinen zuvor freien Raum in seiner Umgebung. Einige neuere Theorien – wie zum Beispiel die Stringtheorie – postulieren zwar durchaus zusätzliche Dimensionen, aber unser dreidimensionaler Raum braucht diese Dimensionen nicht für seine Expansion.

Wie auf der Oberfläche des Ballons, so strebt auch alles in unserem Universum auseinander. Der Urknall war also nicht eine Explosion im Raum, sondern eher eine Explosion des Raums. Er ereignete sich nicht an einem bestimmten Ort, von dem aus das Universum sich

IN KÜRZE

- **Die Ausdehnung des Universums** ist einer der Eckpfeiler der modernen Wissenschaft – und wird doch häufig falsch verstanden.
- Wichtig ist, den Begriff **»Urknall«** nicht zu wörtlich zu nehmen. Er ist keine Explosion, die sich im Raum ereignete. Vielmehr explodierte der Raum selbst.
- Dieser Unterschied zwischen einer **Expansion im Raum** und einer **Expansion des Raums** hat wichtige Folgen für die Größe des Universums, die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien, die Art von Beobachtungen, die den Astronomen möglich sind, sowie für die Natur der beschleunigten Expansion des Universums.
- Streng genommen sagt das Urknallmodell sehr wenig über den Urknall aus – es beschreibt eigentlich, was **nach dem Urknall** geschehen ist.



dann in eine schon vorher vorhandene Leere ausbreitete – er fand überall gleichzeitig statt.

Könnten wir einmal die Zeit rückwärts laufen lassen, so würden wir beobachten, wie alle Regionen im Kosmos zusammenschrumpfen, alle Galaxien sich näher und näher kommen, bis alles wie bei einem gewaltigen kosmischen Verkehrsunfall aufeinander prallt – das ist der Urknall. Der Vergleich mit zusammenstoßenden Fahrzeugen mag vielleicht suggerieren, dass es sich lediglich um ein lokales Hindernis handele, das sich dank der Hinweise des Verkehrsfunks umfahren ließe. Doch dem Urknall kann man nicht ausweichen. Es ist, als würde die Oberfläche der Erde mit allen Autobahnen zusammenschrumpfen, während sich Anzahl und Größe der Fahrzeuge nicht änderten. Irgendwann ist ihre Packungsdichte so stark angewachsen, dass sie überall Stoßstange an Stoßstange stehen – und kein Verkehrsfunk kann mehr eine Ausweichstrecke empfehlen. Überall krachen die Autos ineinander.

Auch der Urknall fand überall statt – in dem Raum, in dem Sie gerade diesen Artikel lesen, ebenso wie an einem Punkt links von Alpha Centauri. Es war keine kosmische Bombe, die an einem bestimmten Ort detonierte, den wir nun als Explosionszentrum identifizieren könnten. Auch in der Ballon-Analogie gibt es keinen Ort auf der Oberfläche, der das Zentrum der Expansion wäre.

So groß wie eine Pampelmuse – und doch unendlich groß

Diese Allgegenwart des Urknalls ist völlig unabhängig von der Größe des Universums – sogar unabhängig davon, ob der Kosmos endlich oder unendlich groß ist. Kosmologen sprechen manchmal davon, unser Universum sei einst so groß wie eine Pampelmuse gewesen. Was sie wirklich meinen, ist: Der Teil des Universums, den wir heute sehen können – der beobachtbare Kosmos –, war einmal so groß wie eine Pampelmuse.

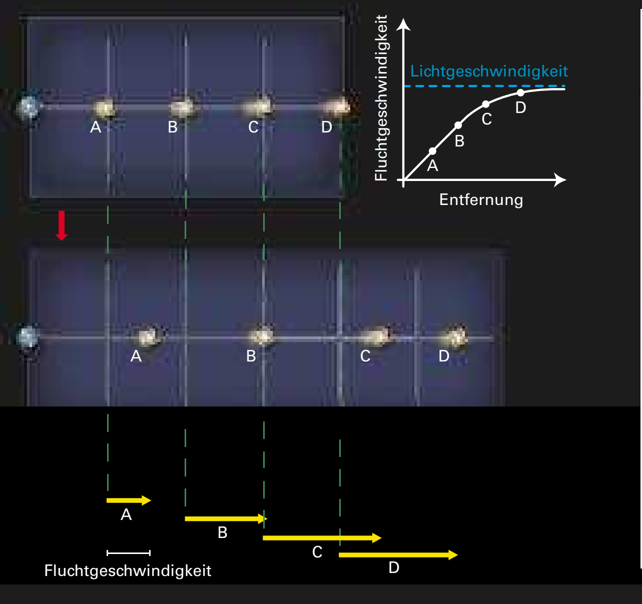
Beobachter in der Andromeda-Galaxie oder einem noch ferneren Sternsystem haben ihr eigenes beobachtbares Universum, das sich zwar mit unserem überschneidet, aber doch etwas davon unterscheidet. Von ihrer Warte aus sehen sie nämlich Galaxien, die wir nicht beobachten können – einfach, weil sie sich etwas näher an ihnen befinden –, und umgekehrt. Diese fremden Intelligenzen sehen einen Kosmos, der ebenfalls einst die Größe einer Pampelmuse hatte. Wir können uns also das frühe Universum als einen Stapel von einander durchdringenden Pampelmusen vorstellen, der sich in alle Richtungen unendlich ausdehnt. Dementsprechend ist die Vorstellung, das Universum sei beim Urknall »klein« gewesen, irreführend. Die Gesamtheit des Weltraums kann unendlich groß sein. Lässt man einen unendlichen Raum um einen beliebigen Faktor zusammenschrumpfen, so bleibt er immer noch unendlich groß.

Auch die quantitative Beschreibung der Expansion steckt voller Fallstricke. Die Rate, mit welcher der Abstand zwischen Galaxien anwächst, folgt einer Re- ▷

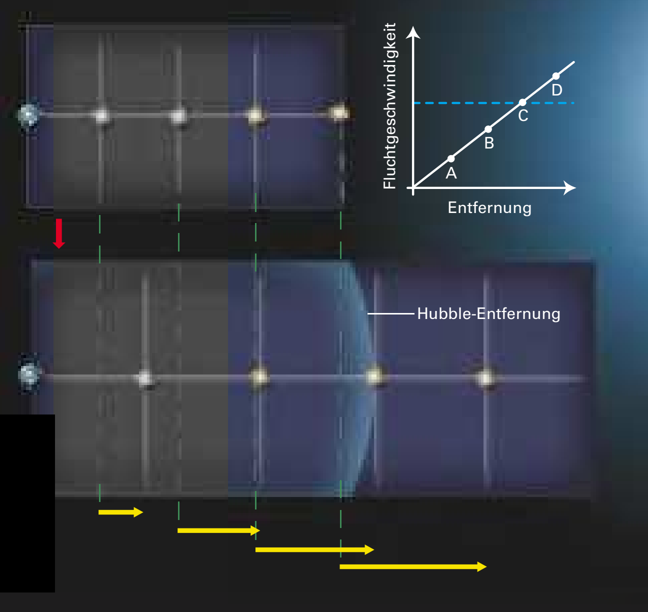
Können sich Galaxien schneller als Licht von uns entfernen?

MISSVERSTÄNDNIS NR. 2 · URKNALL ·

FALSCH: Natürlich nicht – die Spezielle Relativitätstheorie von Einstein verbietet das.
Galaxien – gleich in welchem Raumabschnitt man sie betrachtet – scheinen sich von uns wegzubewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind. Wenn allerdings die Lichtgeschwindigkeit die oberste Grenze ist, muss die Zunahme der Fluchtgeschwindigkeit (gelbe Pfeile) bei großen Entfernungen abflachen (Diagramm).



RICHTIG: Natürlich – die Spezielle Relativitätstheorie gilt nicht für die Fluchtgeschwindigkeit.
Im expandierenden Raum nimmt die Fluchtgeschwindigkeit linear mit der Entfernung zu und übersteigt oberhalb der so genannten Hubble-Entfernung die Lichtgeschwindigkeit. Das verstößt nicht gegen die Spezielle Relativitätstheorie, da die Fluchtgeschwindigkeit nicht durch eine Bewegung im Raum, sondern durch die Expansion des Raums zu Stande kommt.



▷ gel, die Edwin Hubble 1929 entdeckte: Die Fluchtgeschwindigkeit v einer Galaxie ist proportional zu ihrem Abstand d von uns: $v = H \cdot d$. Die Proportionalitätskonstante H dieser Beziehung, Hubble-Parameter oder Hubble-Konstante genannt, beschreibt dabei, wie schnell der Raum expandiert – und zwar nicht nur um uns herum, sondern um jeden Beobachter an einer beliebigen Stelle im Universum.

Auf den ersten Blick betrachtet scheinen sich nicht alle Galaxien an diese Regel zu halten. So bewegt sich beispielsweise die Andromeda-Galaxie – das uns nächste große Sternsystem – auf uns zu und nicht von uns weg. Solche Ausnahmen gibt es, weil das Hubble'sche Gesetz nur das durchschnittliche Verhalten der Galaxien beschreibt. Diesem überlagert sich eine moderate lokale Eigenbewegung, sie umkreisen einander und ziehen sich gegenseitig an – so wie es unser Milchstraßensystem und die Andromeda-Galaxie tun. Auch weit entfernte Galaxien weisen solche Eigenbewegungen auf. Aus unserer Perspektive – also aus großen Entfernungen d betrachtet – sind diese Eigenbewegungen (im Raum) indes viel kleiner als die Fluchtgeschwindigkeit (des Raums) und fallen kaum mehr ins Gewicht. Deshalb gilt für ferne Galaxien das Hubble'sche Gesetz mit großer Genauigkeit.

Effekte der Allgemeinen, nicht der …

Es ist zu beachten, dass die Expansionsgeschwindigkeit dem Hubble'schen Gesetz zufolge mit der Entfernung ansteigt: Wenn sich eine Galaxie mit 1000 Kilometer pro Sekunde von uns entfernt, wird eine andere, die doppelt so weit weg ist, dies mit 2000 Kilometer pro Sekunde tun. Demzufolge müssten Galaxien ab einem bestimmten Abstand von uns, dem so genannten Hubble-Abstand, sich sogar schneller als mit Lichtgeschwindigkeit von uns entfernen. Für den gemessenen Wert des Hubble-Parameters beträgt dieser Abstand etwa 14 Milliarden Lichtjahre.

Bedeutet diese Vorhersage von überlichtschnellen Galaxien, dass Hubbles Gesetz falsch ist? Sagt denn nicht die Spezielle Relativitätstheorie, dass sich nichts schneller als das Licht bewegen kann? Solche Fragen haben schon Generationen von Studenten verwirrt. Die Lösung ist, dass die Spezielle Relativitätstheorie nur für »normale« Geschwindigkeiten gilt, also für Bewegungen im Raum. Die Fluchtgeschwindigkeit in Hubbles Gesetz hingegen wird durch die Expansion des Raums verursacht. Diese ist ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie und unterliegt nicht den Beschränkungen der Speziellen Relativität. Eine Fluchtgeschwindigkeit, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit, verletzt

mithin nicht die Spezielle Relativitätstheorie: Noch immer gilt, dass nichts einen Lichtstrahl überholen kann.

Erste Hinweise auf ein expandierendes Universum hatten die Astronomen in den Jahren von 1910 bis 1930 erhalten, als sie Galaxien spektroskopisch untersuchten. Atome emittieren und absorbieren Licht bestimmter Wellenlängen, die sich in Laborexperimenten messen lassen. In der Strahlung ferner Galaxien zeigt sich das gleiche Muster von Emissions- und Absorptionslinien wie im Labor, doch sind diese Linien zu längeren Wellenlängen hin verschoben. Die Astronomen sprechen von einer »Rotverschiebung« des Galaxienlichts. Die Erklärung für diesen Effekt ist einfach: Expandiert der Raum, dehnen sich auch die Wellenzüge des Lichts, die sich in diesem Raum ausbreiten. Wenn das Universum seine Größe während der Reise der Photonen verdoppelt, strecken sich auch deren Wellenlängen auf das Doppelte und ihre Energie halbiert sich.

… Speziellen Relativitätstheorie

Dieser Prozess lässt sich über den Begriff der Temperatur beschreiben. Die Energie der von einem Körper abgestrahlten Photonen weist nämlich eine Verteilung auf, die in eindeutiger Beziehung zur Temperatur des Körpers steht. Wenn die Photonen sich durch den expandierenden Raum ausbreiten, verlieren sie Energie und ihre Temperatur sinkt. Auf diese Weise kühlt das Universum infolge der Expansion ab, ganz ähnlich wie das in einem Fahrradreifen oder einer Pressluftflasche komprimierte Gas abkühlt, wenn es herausströmt und sich dabei ausdehnt. Die kosmische Hintergrundstrahlung hat heute beispielsweise eine Temperatur von knapp drei Kelvin. Freigesetzt wurde sie hingegen, als das Universum rund 3000 Kelvin heiß war. Während die Temperatur der Photonen also seitdem auf ein Tausendstel gefallen ist, hat sich das Universum entsprechend auf das Tausendfache ausgedehnt. Durch Beobachten von Gas in fernen Galaxien vermochten die Astronomen direkt die Temperatur der Hintergrundstrahlung in der Vergangenheit zu messen. Damit bestätigten sie, dass der Kosmos im Verlauf der Zeit abgekühlt ist.

Über den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Geschwindigkeit gibt es viele Missverständnisse. So wird die durch die Expansion verursachte Rotverschiebung oft mit der bekannteren Rotverschiebung durch den Doppler-Effekt verwechselt. Der gewöhnliche Doppler-Effekt, der die Wellenlänge von Schallwellen verändert, wenn sich die Schallquelle relativ zu uns bewegt, ist aus dem Alltag vertraut: Der Ton eines Martinshorns zum Beispiel klingt tiefer, wenn sich der Rettungswagen von uns entfernt. Dasselbe Prinzip gilt auch für die Wellenlänge von Licht, wenn sich die Strahlungsquelle durch den Raum von uns wegbewegt.

Das ist zwar ähnlich, aber nicht identisch zu dem, was mit dem Licht ferner Galaxien geschieht. Die kosmologische Rotverschiebung unterscheidet sich vom normalen Doppler-Effekt. Ungeachtet dessen bringen viele Astronomen immer wieder diesen Vergleich, womit sie ihren Studenten keinen Gefallen tun. Für die Doppler-Rotverschiebung und die kosmologische Rotverschiebung gelten zwei unterschiedliche Gleichungen. Die erste stammt aus der Speziellen Relativitätstheorie, welche die Expansion des Raums nicht beinhaltet, während die zweite sich aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ableitet und ebendiese Expansion berücksichtigt. Die Ergebnisse beider Gleichungen sind für nahe Galaxien fast identisch, divergieren aber für ferne Galaxien.

Gemäß normalem Doppler-Effekt strebt die Rotverschiebung von Himmelskörpern umso stärker gegen unendlich, je weiter sich deren Geschwindig- ▷

Eine ermüdende Hypothese

Wenn in Spektrum der Wissenschaft ein Artikel über Kosmologie erscheint, treffen kurz darauf Briefe in der Redaktion ein, in denen Leser argumentieren, die Galaxien würden sich gar nicht von uns entfernen – die Expansion des Weltraums sei vielmehr eine Illusion. In Wahrheit »ermüde« das Licht auf seiner langen Reise zu uns, und dies verursache die beobachtete Rotverschiebung. Irgendein Prozess stehle den Photonen Energie, sodass sich ihre Wellenlängen vergrößern, während sie sich im Raum ausbreiten.

Diese These, die noch aus den Anfangszeiten der spektroskopischen Untersuchung von Galaxien stammt, erscheint auf den ersten Blick plausibel. Doch sie widerspricht den Beobachtungen. Wenn beispielsweise ein Stern als Supernova explodiert, steigt seine Helligkeit zunächst rasch an und fällt dann langsam wieder ab. Für den Supernova-Typ, den die Astronomen zur kosmischen Entfernungsmessung verwenden, dauert dieser Vorgang etwa zwei Wochen. Die Photonen, welche die Supernova innerhalb dieser Zeitspanne aussendet, sollten – so die These von der Lichtermüdung – auf ihrem Weg zu uns Energie verlieren, also langwelliger werden, aber dennoch einen zwei Wochen andauernden Strom von Photonen darstellen.

Die Expansion des Alls streckt jedoch nicht nur die einzelnen Photonen, sondern den gesamten Photonenstrom. Das innerhalb von zwei Wochen emittierte Licht kommt demnach auf der Erde in einem Zeitraum an, der länger ist als zwei Wochen. Den Effekt konnten die Astronomen jüngst tatsächlich nachweisen: Eine Supernova in einer Galaxie mit einer Rotverschiebung von 0,5 scheint drei Wochen zu dauern, bei einer Rotverschiebung von 1 sogar vier Wochen.

Zudem widerspricht die Lichtermüdungsthese auch dem beobachteten Spektrum der Hintergrundstrahlung und der gemessenen Flächenhelligkeit ferner Galaxien.



P. CHALLIS, CENTER FOR ASTROPHYSICS / STSCI / NASA

Supernova (Pfeil) in einer Galaxie des Virgo-Haufens. Anhand solcher Sternexplosionen können die Astronomen den Verlauf der kosmischen Expansion untersuchen. Ihre Beobachtungen widerlegen alternative Theorien, in denen der Raum nicht expandiert.

Können wir Galaxien sehen, die sich schneller als Licht von uns entfernen?

MISSVERSTÄNDNIS NR. 3 · URKNALL ·

FALSCH: Natürlich nicht. Denn Licht dieser Galaxien kann uns nie erreichen.
Die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie jenseits der Hubble-Entfernung (Kugelhülle um die Erde) ist höher als die Lichtgeschwindigkeit. Während sich ein von jener Galaxie emittiertes Photon (gelb) durch das Weltall bewegt, dehnt sich dieses aus. Die Entfernung zur Erde wächst schneller an, als sich das Photon bewegt, wie bei einem Schwimmer, der gegen den Strom schwimmt – folglich kann es uns nie erreichen.

RICHTIG: Natürlich, denn die Expansionsrate ändert sich mit der Zeit.
Anfangs wird das Photon tatsächlich durch die Expansion von uns weggedrängt. Doch die Hubble-Entfernung ist nicht konstant: Sie wächst an, und zwar so weit, dass sie schließlich das Photon erreicht. Befindet sich das Photon aber erst einmal innerhalb des Hubble-Abstands, bewegt es sich schneller auf uns zu, als sich die Entfernung zur Erde vergrößert – es kann uns also erreichen.

keit im Raum der Lichtgeschwindigkeit nähert. Die Wellenlängen sind schließlich so weit rotverschoben, dass sie nicht länger beobachtbar sind. Wäre das für Galaxien die richtige Beschreibung, so müssten die fernsten, gerade noch sichtbaren Objekte am Himmel eine Fluchtgeschwindigkeit von knapp unterhalb der Lichtgeschwindigkeit haben. Doch die Formel für die kosmologische Rotverschiebung liefert ein anderes Resultat: Im gegenwärtigen Standardmodell der Kosmologie ist die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien bereits bei einer Rotverschiebung von 1,5 – wenn also Wellenlängen der Strahlung 50 Prozent länger sind als im Labor – gleich der Lichtgeschwindigkeit. Die Astronomen haben inzwischen rund tausend Galaxien mit Rotverschiebungen größer als 1,5 beobachtet. Das heißt: Für mindestens tausend Objekte ist die Fluchtgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit. Umgekehrt gilt, dass auch wir uns von diesen Galaxien mit Überlichtgeschwindigkeit entfernen. Die Strahlung des Mikrowellenhintergrunds hat eine noch längere Reise hinter sich und weist eine Rotverschiebung von 1000 auf. Als das heiße Plasma des frühen Universums die Strahlung emittierte, die wir jetzt empfangen, entfernte es sich von uns mit fünfzigfacher Lichtgeschwindigkeit.

Anrennen gegen die Expansion

Die Vorstellung, wir könnten Galaxien sehen, die sich schneller als Licht bewegen, erscheint zunächst geradezu mystisch. Es ist die Änderung der Expansionsrate, die dieses Phänomen ermöglicht. Angenommen, ein Lichtstrahl, der weiter als die Hubble-Entfernung von 14 Milliarden Lichtjahren von uns entfernt ist, versuche, sich in unsere Richtung zu bewegen. Relativ zu seiner lokalen Umgebung strebt er mit Lichtgeschwindigkeit auf uns zu – aber diese lokale Umgebung entfernt sich infolge der kosmischen Expansion mit einer Fluchtgeschwindigkeit von uns, die größer als die Lichtgeschwindigkeit ist.

Wenngleich sich also der Lichtstrahl mit der größtmöglichen Geschwindigkeit auf uns zu bewegt, vermag er mit der Expansion des Raums nicht Schritt zu halten. Photonen, die sich exakt in der Hubble-Entfernung befinden, ergeht es so wie Alice im Wunderland und der roten Königin: Obwohl sie so schnell laufen, wie sie können, bleiben sie doch am selben Ort.

Daraus könnten wir schließen, Licht von jenseits der Hubble-Entfernung könne uns niemals erreichen, seine Quellen wären uns auf ewig verborgen. Doch der Hubble-Abstand ist keine konstante Größe, denn er hängt vom Hubble-Parameter ab, der sich im Lauf der Zeit ändert. Der Hubble-Parameter ist proportional zu der Rate, mit der sich der Abstand zwischen zwei Galaxien durch die Expansion ändert, geteilt durch den Abstand selbst. (Diese Rechnung kann dabei mit zwei beliebigen Galaxien durchgeführt werden.) In den kosmologischen Modellen, die mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen, wächst der Nenner schneller an als der Zähler – der Hubble-Parameter nimmt also mit der Zeit ab.

Auf diese Weise nimmt der Hubble-Abstand im Lauf der Zeit zu. Demzufolge gelangt Licht, das ursprünglich außerhalb des Hubble-Abstands war, irgendwann durch diese Front hindurch. Die Photonen befinden sich dann in einem Bereich mit einer Fluchtgeschwindigkeit, die kleiner ist als die Lichtgeschwindig-

keit – und können uns deshalb nun erreichen.

Doch die Galaxie, von der die Photonen stammen, mag sich durchaus weiterhin mit Überlichtgeschwindigkeit von uns entfernen. Aus diesem Grund können wir das Licht von Galaxien registrieren, die sich stets mit Überlichtgeschwindigkeit von uns entfernt haben – und dies auch künftig tun werden. Anders ausgedrückt: Der Hubble-Abstand ist keine feste Größe und markiert darum nicht die Grenze des beobachtbaren Universums.

Was aber begrenzt den beobachtbaren Raum? Auch bei dieser Frage gibt es einige Verwirrung. Würde das Weltall nicht expandieren, so könnten wir bis in eine Entfernung von 14 Milliarden Lichtjahren blicken – denn genau diese Strecke kann das Licht seit dem Urknall vor 14 Milliarden Jahren zurückgelegt haben. Aber weil das Universum expandiert, wächst der Raum, den ein Photon bereits durchquert hat, während seiner weiteren Reise an. Dadurch ist die gegenwärtige Entfernung der fernsten Objekte, die wir sehen können, etwa dreimal so groß, nämlich 46 Milliarden Lichtjahre.

Kosmischer Ereignishorizont

Die jüngste Entdeckung, nämlich dass sich die kosmische Expansion beschleunigt, macht die Dinge noch interessanter. Zuvor hatten die Kosmologen geglaubt, dass wir in einem Universum leben, dessen Expansionsgeschwindigkeit abnehme – und dass folglich nach und nach immer mehr Galaxien in unser Blickfeld gerieten. In einem Universum mit beschleunigter Expansion hingegen sind wir von einer Grenze umgeben, hinter der Dinge geschehen, die wir niemals sehen werden – ein kosmischer Ereignishorizont. Wenn uns das Licht von Galaxien erreichen soll, deren Fluchtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit übersteigt, dann muss die Hubble-Entfernung anwachsen. Doch in einem beschleunigt expandierenden Kosmos hört die Hubble-Entfernung irgendwann auf, größer zu werden. Ferne Quellen mögen Licht in unsere Richtung aussenden, doch dieses Licht ist wegen der beschleunigten Expansion hinter der Hubble-Entfernung gefangen.

In dieser Hinsicht ähnelt ein Universum mit beschleunigter Expansion einem Schwarzen Loch: Beide haben einen Ereignishorizont, hinter den wir nicht blicken können. Die augenblickliche Entfernung zu unserem kosmischen Ereignishorizont beträgt 16 Milliarden Lichtjahre, er befindet sich also deutlich innerhalb des von uns beobachtbaren Bereichs. Licht, das jetzt von Galaxien ausgeht, die sich jenseits des kosmischen Ereignishorizonts befinden, kann uns niemals erreichen – der Raum zwischen ihnen und uns expandiert zu schnell. Wir werden zwar solche Ereignisse sehen können, die in diesen Galaxien stattfanden, bevor sie den Horizont überquerten; aber nachfol- ▷

Warum gibt es eine kosmische Rotverschiebung?

MISSVERSTÄNDNIS NR. 4 · URKNALL ·

FALSCH: Da sich die entfernenden Galaxien durch den Raum bewegen und ihr Licht dabei eine Doppler-Verschiebung erfährt. Entfernt sich die Lichtquelle von der Erde, werden die emittierten Lichtwellen durch den Doppler-Effekt gestreckt, also zu roten Wellenlängen verschoben (oben). Während der weiteren Ausbreitung im Weltall ändert sich die Wellenlänge des Lichts nicht (Mitte). Der Beobachter empfängt das Licht, misst seine Doppler-Rotverschiebung und berechnet daraus die Geschwindigkeit der Galaxie (unten).





RICHTIG: Da der expandierende Raum alle Lichtwellen während ihrer Ausbreitung dehnt. Die Eigenbewegung der Galaxien ist im kosmologischen Rahmen vernachlässigbar. Das von ihnen emittierte Licht hat also in allen Richtungen dieselbe Wellenlänge (oben). Da das Weltall expandiert, wird auch die Wellenlänge des Lichts gestreckt; die Rotverschiebung nimmt also zu (Mitte und unten). Die kosmologische Rotverschiebung unterscheidet sich von derjenigen, die der Doppler-Effekt hervorrufen würde.

gende Ereignisse werden für alle Zeiten außerhalb unserer Sichtweite bleiben.

In dem Film »Der Stadtneurotiker« erklärt der vom jungen Woody Allen gespielte Alvy Singer seinem Therapeuten und seiner Mutter, warum er seine Hausaufgaben nicht machen kann: »Das Universum expandiert ... Das Universum ist alles – und wenn es expandiert, wird es eines Tages auseinander brechen, und das ist das Ende von allem!« Doch seine Mutter weiß es besser: »Du bist hier in Brooklyn. Und Brooklyn expandiert nicht!«

Warum Brooklyn nicht expandiert

Manche Leute denken wie Alvy: Wenn der Weltraum expandiert, müsse sich auch alles, was sich innerhalb des Weltraums befindet, ausdehnen. Aber das stimmt nicht. Die Ausdehnung des Raums an sich – also ohne Beschleunigung oder Abbremsung – übt keine Kraft aus. Die Wellenlänge von Photonen dehnt sich mit dem Universum aus, weil Photonen im Gegensatz zu materiellen Dingen wie Atomen und Städten keine zusammenhängenden Körper sind, deren Größe durch ein Gleichgewicht von Kräften reguliert wird. Eine Änderung der Expansionsrate verursacht zwar eine zusätzliche Kraft, aber selbst diese führt nicht dazu, dass Körper sich ausdehnen oder schrumpfen.

Würde beispielsweise die Schwerkraft stärker, so würde unser Rückenmark soweit zusammengestaucht, bis die Elektronenhüllen der Atome in unserer Wirbelsäule ein neues Gleichgewicht erreicht hätten. Dadurch würden die Atome etwas näher beieinander liegen und wir wären etwas kleiner als zuvor, doch wir würden nicht weiter schrumpfen. Ganz ähnlich verhielte es sich in einem Universum, in dem die Anziehungskraft der Gravitation dominierte. Die Expansion würde durch die Anziehungskraft abgebremst und daher einen schwachen Druck auf alle Körper im Kosmos ausüben, die dadurch eine etwas kleinere Gleichgewichtsgröße hätten. Aber sie würden nicht beständig weiter schrumpfen.

Bis vor Kurzem noch glaubten die Kosmologen, wir würden in einem solchen Universum leben. Doch die Expansion beschleunigt sich, und das führt zu einer kleinen, nach außen gerichteten Kraft auf alle Körper. Alle gebundenen Körper sind also etwas größer, als sie es in einem Universum mit gleichmäßiger Expansion wären, weil die Kräfte ihr Gleichgewicht bei einer geringfügig größeren Abmessung einnehmen. Auf der Oberfläche der Erde beträgt diese nach außen gerichtete Kraft nur einen winzigen Bruchteil (10^{-30}) der nach innen gerichteten Gravitation. Wenn sie konstant ist, führt sie nicht zu einer Expansion der Erde, sondern nur dazu, dass die Erde ihr statisches Gleichgewicht bei einem etwas größeren Durchmesser erreicht.

Diese Argumentation gilt natürlich nicht mehr, wenn die Beschleunigung nicht konstant ist, wie einige Kosmologen spekulieren. Wenn die Beschleunigung selbst anwächst, könnte sie irgendwann so stark werden, dass sie alle Strukturen im Kosmos

Wie groß ist das beobachtbare Universum?

MISSVERSTÄNDNIS NR. 5 · URKNALL

FALSCH: Das Universum ist 14 Milliarden Jahre alt, also beträgt der Radius des beobachtbaren Universums 14 Milliarden Lichtjahre. Betrachten wir die fernste, gerade noch beobachtbare Galaxie: Die von ihr kurz nach dem Urknall ausgesendeten Photonen erreichen uns gerade jetzt. Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die ein Photon in einem Jahr zurücklegt. Also hat ein Photon dieser Galaxie 14 Milliarden Lichtjahre zurückgelegt.

RICHTIG: Da das Weltall expandiert, ist der beobachtbare Teil unseres Universums größer als 14 Milliarden Lichtjahre. Während sich ein Photon auf dem Weg zu uns befindet, dehnt sich der von ihm durchquerte Raum aus. Zum Zeitpunkt seines Eintreffens bei uns ist also die Entfernung seiner Strahlungsquelle von uns größer als der sich aus der Reisezeit des Photons ergebende zurückgelegte Lichtweg – und zwar etwa dreimal so groß.

14 Milliarden Lichtjahre

46 Milliarden Lichtjahre

Expandieren die Himmelskörper im Universum ebenfalls?

MISSVERSTÄNDNIS NR. 6 · URKNALL ·

FALSCH: Ja, die Expansion lässt das Universum und alles, was sich in ihm befindet, anwachsen. Greifen wir ein Objekt heraus – einen Galaxienhaufen. Wenn das Universum größer wird, wachsen auch die Galaxien und der Haufen. Die äußere Begrenzung des Galaxienhaufens (gelber Rahmen) bewegt sich nach außen.

Galaxienhaufen

RICHTIG: Nein. Nur das Universum expandiert, zusammenhängende Objekte in ihm verändern sich nicht. Anfangs werden benachbarte Galaxien tatsächlich auseinander gezogen, doch irgendwann überwiegt ihre gegenseitige Anziehungskraft die Expansion. Es bildet sich ein Galaxienhaufen, der einen Gleichgewichtszustand mit fester Größe einnimmt.

zerreißt. In Analogie zum »Big Bang«, dem englischen Begriff für den Urknall, sprechen die Kosmologen vom »Big Rip«, dem großen Riss. Doch zu diesem finalen Zerreißen des Kosmos käme es nicht auf Grund der Expansion oder der Beschleunigung an sich, sondern auf Grund der beschleunigten Beschleunigung.

Das Urknallmodell stützt sich inzwischen auf eine Reihe von Beobachtungsbefunden: die Expansionsbewegung des Universums, die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, die Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente im All sowie die klumpige Anordnung der Materie. Wie alle wissenschaftlichen Ideen wird dieses Modell eines Tages durch ein anderes abgelöst werden. Aber von allen gegenwärtigen Modellen erklärt es die beobachteten Daten am besten. Neue und genauere Messungen werden es den Kosmologen erlauben, die Expansion und deren Beschleunigung immer besser zu verstehen. Deshalb können sie immer grundlegendere Fragen über die frühesten Zeiten und die größten Strukturen im Kosmos stellen.

Was löste überhaupt die Expansion aus? Viele Kosmologen sehen die so genannte Inflation als mögliche Ursache, eine Form der beschleunigten Expansion im frühen Kosmos. Doch das kann nur ein Teil der Antwort sein, denn zum Auslösen der Inflation scheint bereits ein expandierendes Universum nötig zu sein.

Und was ist mit den größten Strukturen, jenseits all dessen, was wir sehen können? Expandieren verschiedene Teile des Universums verschieden schnell? Ist unser Universum eine inflationäre Blase in einem viel größeren Multiversum? Niemand weiß es. Viele Fragen sind noch offen. Doch während unser Universum auf ewig expandieren wird, hoffen wir, dass die Verwirrung über die Expansion mit der Zeit schrumpft. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Charles H. Lineweaver und **Tamara M. Davis** arbeiten als Astronomen am Mount-Stromlo-Observatorium in der Nähe von Canberra (Australien). Anfang der 1990er Jahre, während seiner Zeit an der Universität von Kalifornien in Berkeley, war Lineweaver Mitglied des »Cosmic Background Explorer«-Teams, das winzige Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung entdeckt hat. Davis arbeitet an der »Supernova/Acceleration Probe«, einem in der Entwicklung befindlichen Weltraumobservatorium.

Der Urknall. Anfang und Zukunft des Universums. Von Hans-Joachim Blome. C.H.Beck, 2004

Kosmologie. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 2/2000

Cosmology: the science of the universe. Von Edward R. Harrison. Cambridge University Press, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DAS JO-JO

Lange Schlafdauer sehr erwünscht

Zusatzgewichte, Kugellager und spezielle Achsen machen aus dem Jo-Jo ein Spielzeug für Jongleure.

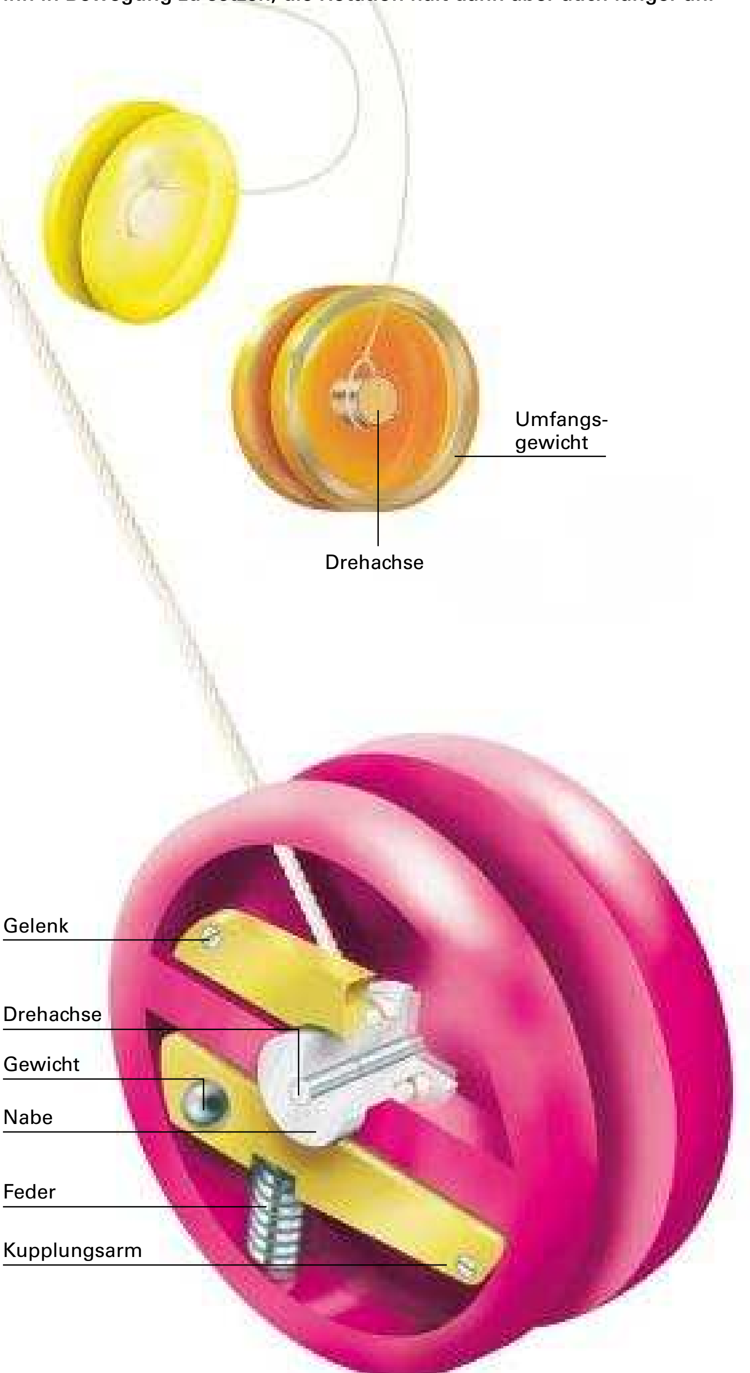
Von Mark Fischetti

Eine Schnur und zwei mit einer Achse verbundene Scheiben, das ist der klassische Aufbau eines Jo-Jos. Die Schnur wird um die Achse gewickelt, der Körper rollt auf Grund der Schwerkraft an ihr entlang zu Boden und erhält so einen Drehimpuls. Der sorgt dann auch dafür, dass das Jo-Jo wieder nach oben wandert, wenn es einen Knoten erreicht, der Schnur und Achse fest verbindet. Auf den Philippinen entstand die Idee, diesen durch eine Schlaufe zu ersetzen, sodass das Jo-Jo auch im Freilauf rotieren kann (siehe Grafik). Im Fachjargon spricht man dann vom »Sleeper« (zu Deutsch Schläfer). Er ist die Basis von Tricks wie dem »Walk the Dog« (sinngemäß: Gassi gehen), bei dem das Jo-Jo wie ein Hund vor dem Akteur auf dem Boden entlangrollt.

Auch als Plastik Holz und Metall ersetzte, blieb das Design im Prinzip das gleiche. In den späten 1980er und 1990er Jahren kamen Neuerungen wie Umfangsgewichte auf den Markt, um das Trägheitsmoment des Jo-Jos zu vergrößern, sowie Kugellager und Kupplungen, um die Reibung zu minimieren. Damit verlängerten sich die Freilaufphasen. Der Rekord stieg von 15 bis 20 Sekunden auf 14,03 Minuten im Oktober 2003. Professionelle Spieler kennen mehr als 2000 Tricks und verschiedene Wurfstile. Freilich braucht es dazu mehr als ein Kaufhaus-Jo-Jo. Enthusiasten geben für ein Profi-Exemplar einige dutzend Euro aus. Für das Spitzenmodell von Duncan Toys reicht das allerdings noch nicht: Sein Korpus aus 99 Prozent Magnesium und sein Keramik-Präzisionsfreilauf schlagen mit fast 400 Euro zu Buche. ◁

Der Autor Mark Fischetti ist freier Mitarbeiter der Redaktion von Scientific American.

▼ Bei einfachen Jo-Jos ist die Schnur an der Achse fixiert. Raffinierter ist es, sie mit einer Schlaufe anzubinden. Dann kann sich der Körper frei drehen beziehungsweise »schlafen«. Zusätzliche Masse auf dem äußeren Rand erhöht das Trägheitsmoment des Drehkörpers. Es erfordert dann zwar mehr Energie, ihn in Bewegung zu setzen, die Rotation hält dann aber auch länger an.



▲ Eine Fliehkraftkupplung verlängert die »Schlafphase«. Dazu wird die Schnur um eine frei laufende Nabe gebunden. Die beiden Backen der Kupplung öffnen sich bei hohen Drehzahlen unter der Wirkung der Fliehkraft, sodass diese Nabe rotieren kann – der Einfluss der Reibung an der Schnur wird auf diese Weise wirksam reduziert. Bei nachlassender Drehung aber drücken die beiden Federn die Backen zurück, bis diese die Nabe umschließen – die Schnur wickelt sich auf.

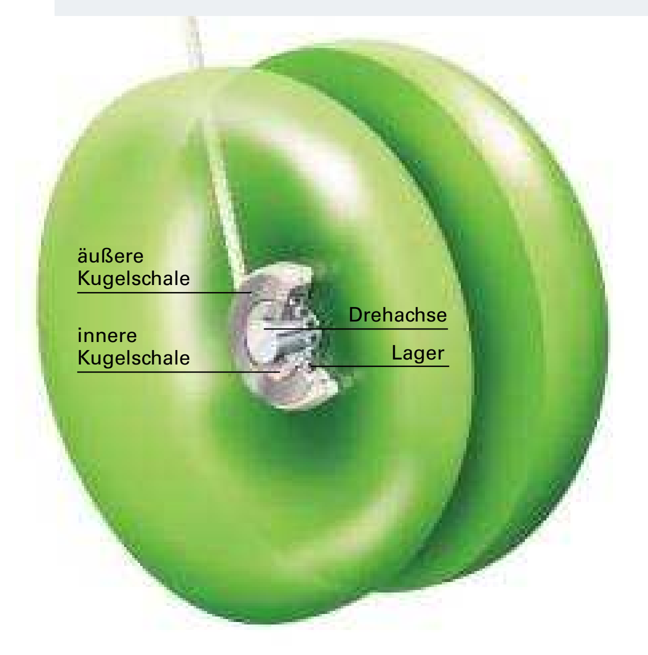
KENT SNODGRASS, PRECISION GRAPHICS; SCHWARZ-WEISS ZEICHNUNGEN NACH: D.W. WATSON, YO-YO PHYSICS, AN ENGINEER'S NOTEBOOK

WUSSTEN SIE SCHON?

Den ältesten Nachweis eines Jo-Jos liefert die Darstellung auf einer griechischen Schale aus der Zeit um 500 v. Chr. Im 18. Jahrhundert waren das französische *émigrétte* oder das englische *quiz* Aristokratenspielzeuge. Die ersten deutschen Meisterschaften fanden 1998 statt. Selbst im Weltraum wurden Jo-Jos ausprobiert, wobei dort viele Tricks mangels Schwerkraft nicht funktionieren: Beim »Sleeper« kehrte das Jo-Jo sofort in die Hand des Astronauten zurück.

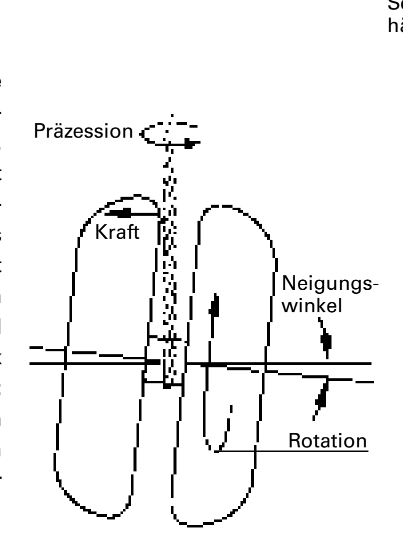
Der in die USA ausgewanderte Filipino Pedro Flores patentierte das Design 1928 und brachte das Produkt unter seinem Namen auf den Markt. Billig und haltbar, war dieses Jo-Jo einer der wenigen kommerziellen Erfolge in der Zeit der amerikanischen Depression. Vier Jahre später kaufte der Geschäftsmann Donald Duncan das Unternehmen Flores auf und ließ »Jo-Jo« als Markennamen registrieren. Erst 1965 entschied ein Bundesgericht, dass Jo-Jo ein allgemeiner Begriff geworden war. Duncan ging bankrott und musste seine Firma verkaufen, der Markenname blieb so bis heute erhalten.

Die Geschichte des Jo-Jo mag unvollständig sein, aber viele sagen, dass unsere amerikanische Mutterzeitschrift Scientific American selbst den Begriff eingeführt hat. Diese Aussagen beziehen sich auf einen Artikel von 1916 mit dem Titel »Philippinische Spielzeuge«. Der Artikel zeigte, wie man drehende Scheiben herstellt, und sagte, dass der korrekte Name Jo-Jo sei, was in der Sprache der Filipinos »Komm-komm« oder »Komm-zurück« heiße.

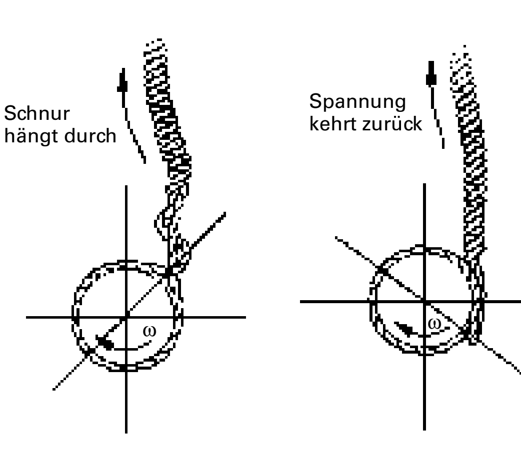


Kugelgelagerte Naben minimieren die Reibung stärker als jede andere Konstruktion. Sie ermöglichen Rotationsgeschwindigkeiten bis zu 140 Drehungen pro Minute.

Freilauf beziehungsweise »Schlaf« beginnt, wenn die Schnur vollständig abgewickelt ist und das Jo-Jo in einer Schlaufe um seine Achse rotiert. Spieler sind bestrebt, diese Phase möglichst lang auszudehnen. Dazu ist ein großes Trägheitsmoment von Vorteil, da es Rotationsenergie speichert. Außerdem sollte der übertragene Drehimpuls möglichst groß sein. Deshalb wirft der Spieler das Jo-Jo mit einem kurzen, kraftvollen Ruck. Es würde das Schnurende aber ebenso ruckartig erreichen und sofort wieder zurücklaufen. Daher gibt der Spieler in diesem Moment mit dem Handgelenk kurz etwas nach.



Präzession, also das Kreiseln um die Drehachse, kann ein Jo-Jo zum Taumeln bringen, bevor es wieder aufsteigt. Zieht der Spieler es zu schräg hoch, berührt die Schnur den Rand und erzeugt ein Drehmoment in die Gegenrichtung, sodass das Jo-Jo zu torkeln beginnt. Zudem bewirkt die Reibung zwischen Schnur und Rand ein Drehmoment, das den Körper horizontal neigt. Das nutzen Könner für den Trick »schlafende Schönheit« (Sleeping Beauty): Indem sie das Jo-Jo in der Waagrechten werfen und anschließend die Schnur nach oben ziehen, steigt es an ihr in horizontaler Lage auf.



Ein kurzer Ruck, und das Jo-Jo erwacht. Denn sobald dieser Zug nachlässt, hängt die Schnur kurz durch, legt sich auf die Achse und die Reibung steigt sprunghaft an.

An der Schwelle des Bewusstseins

Unwissentlich wahrgenommene Bilder finden zwar keinen Eingang in unser bewusstes Erleben, werden aber dennoch vom Gehirn verarbeitet. Hier bietet sich die Chance, die psychologische Natur und die neurale Basis vieler unbewusster kognitiver Prozesse zu ergründen.

Von Lionel Naccache
und Stanislas Dehaene

Bewusstsein mit naturwissenschaftlichen Methoden erforschen zu wollen mag als überehrgeiziges, an Naivität grenzendes Vorhaben erscheinen. Doch die prinzipiellen Fragen, die sich dem Neurowissenschaftler stellen, sind verblüffend einfach:

- Entsteht Bewusstsein in einer bestimmten Hirnregion, hat es ein eigenes Zentrum? Wenn nicht – auf welche Aktivität des Gehirns stützt sich das Phänomen dann?
- Nehmen wir mehr wahr, als uns bewusst wird, kann also das Gehirn auch ohne unser Wissen Informationen aufnehmen und verarbeiten? Wenn ja – worin unterscheiden sich dann bewusste und unbewusste mentale Repräsentationen eines Objekts im Gehirn?

Angesichts dieser Fragen wird klar, welche Bedeutung die wissenschaftliche Erforschung der unbewussten Kognition in diesem Zusammenhang besitzt: Sie eröffnet umgekehrt einen wertvollen Blick auf charakteristische Eigenschaften bewusster Vorgänge.

Das dabei verwendete Instrumentarium reicht von wahrnehmungspsychologischen Experimenten bis zu modernen bildgebenden Verfahren, die Veränderungen in der Hirnaktivität erfassen. Auf Basis der damit gewonnenen Erkenntnisse haben wir – gemeinsam mit einigen anderen Forschern – ein allgemeines Modell der bewussten und unbewussten Informationsverarbeitung entwickelt.

Um mehr über unbewusste mentale Repräsentationen herauszufinden, beschreiten Psychologen zwei Wege. Einer ist die Untersuchung von Menschen, bei denen infolge von Hirnschäden gewisse bewusste Vorgänge teilweise oder ganz ausgefallen sind. Unwissentlich ablaufende Prozesse lassen sich daher hier gewissermaßen unverdeckt studieren. Mehrere Psychologenteams haben dies seit Ende der 1960er Jahre getan.

Die Arbeitsgruppe von Ernst Pöppel an der Universität München und das Team des englischen Psychologen Larry Weiskrantz von der Universität Oxford untersuchten beispielsweise Patienten mit so genannter Rindenblindheit. Hier ist das Auge zwar intakt, die primäre Sehrinde am hinteren Pol des Gehirns aber teilweise zerstört. Im Gesichtsfeld treten dann blinde Bereiche – Skotome – auf. Bei gewissen Tests geschah jedoch etwas Unerwartetes: Die Patienten nahmen offensichtlich auch aus den »blinden« Ausschnitten des Gesichtsfelds Informationen auf – obwohl sie versicherten, sie hätten dort nichts gesehen. Wenn sie zum Beispiel »raten« mussten, ob dort ein Reiz erschienen war, wobei ▷

Unterschwellig dargebotene Ziffern oder andere Objekte sind im Experiment so kurz zwischen anderen Mustern sichtbar, dass sie nicht in unser Bewusstsein dringen, vom Gehirn aber trotzdem verarbeitet werden. Auf diesem Weg lässt sich untersuchen, wie sich bewusste und unbewusste Verarbeitung unterscheiden.

*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*

▷ sie nur mit »da« oder »nicht da« antworten durften, lagen sie oft richtig. Bei einer anderen dieser »erzwungenen Entscheidungen« konnten sie ihren Blick genau auf den Punkt richten, wo ein Reiz erschien. Dieses sonderbare Phänomen ist mittlerweile als Blindsehen bekannt.

Analog gibt es auch unbewusste Formen des Gedächtnisses. Dies haben Untersuchungen an einigen Patienten mit schwerer anterograder Amnesie gezeigt. Die Betroffenen vergessen jedes neue Erlebnis sofort wieder und können keinerlei autobiografische Erinnerungen mehr aufbauen. Was vor dem Eintreten des Gedächtnisverlusts geschah, ist ihnen jedoch weit gehend gegenwärtig. Überraschenderweise konnten die Betroffenen trotz ihres Handikaps relativ komplexe Bewegungen erlernen, die mehrere Trainingssitzungen erfordern. So meisterten sie genauso schnell wie Gesunde die motorische Aufgabe, mit dem Finger exakt einem Punkt auf einer rotierenden Scheibe zu folgen – auch wenn sie alle vorausgegangenen Übungseinheiten sogleich wieder »vergessen« hatten.

Maskierte Reize

Inzwischen sind derartige Dissoziationen von den meisten klassischen neuropsychologischen Störungen bekannt, zum Beispiel von der Aphasie, bei der Sprachverständnis oder -produktion beeinträchtigt ist, oder von der Prosopagnosie, bei der die Betroffenen Gesichter zwar sehen, aber nicht mehr zuordnen können.

Doch wie lassen sich unbewusste mentale Repräsentationen bei gesunden Menschen reproduzierbar messen? Psychologen haben dazu eine Palette experimenteller Verfahren ausgearbeitet. Das bekannteste davon bedient sich der unterschwelligen Wahrnehmung. Hierbei präsentiert man einer Versuchsperson für etwa zwanzig bis vierzig Millisekunden auf einem Bildschirm einen Reiz, etwa ein Wort. Zwischen einer unmittelbar vorher und nachher eingeblendeten »Maske«, beispielsweise einem geometrischen Muster, kann eine derart kurze Darbietung nicht bewusst wahrgenommen werden. Man sagt, der maskierte Reiz bleibt unterschwellig, subliminal. Obwohl er nicht in das Bewusstsein dringt, kann er aber kognitiv verarbeitet werden – erkenntlich daran, dass er die Reaktion von Versuchsteilnehmern auf einen späteren, wissentlich wahrgenommenen »Zielreiz« beeinflusst.

Wir haben beispielsweise bei einer Reihe von Experimenten unseren Probanden zwei arabische Ziffern zwischen »1« und »9« mit Ausnahme der »5« präsentiert: die erste als maskierten Testreiz, die zweite als Zielreiz. Die Aufgabe lautete, schnellstmöglich den linken oder den rechten Knopf zu drücken, je nachdem, ob die Zielzahl größer oder kleiner als fünf war (siehe Kasten auf der rechten Seite). Wie sich zeigte, kam bei stimmiger Test- und Zielzahl – beide jeweils über oder unter fünf – die richtige Antwort schneller als bei inkongruenten Reizen. Die Reaktion zeugt von einer unbewussten Verarbeitung der »unsichtbaren« Testzahl. Fachleute sprechen von einem maskierten oder unbewussten Priming – der englische Begriff bedeutet unter anderem Instruktion, Vorbereitung.

Auf welcher Stufe aber werden derart dargebotene Testzahlen im Gehirn repräsentiert? Tatsächlich könnte das unbewusste Verarbeiten auf verschiedenen Ebenen der Codierung erfolgen. Die erste Ebene enthielte die rein visuelle Repräsentation des Reizes, etwa die analysierte geometrische Form oder Kontur einer Ziffer wie 2 oder 4; die letzte Ebene enthielte die motorische Repräsentation der beabsichtigten Reaktion, Drücken von einem der Knöpfe etwa mit der rechten Hand. Dazwischen lägen noch die Stufen der lexikalischen Verarbeitung, wo beispielsweise »4« und »vier« demselben Objekt entsprechen, sowie der Semantik, auf der nur die Menge bezeichneter Elemente codiert wird (siehe Kasten unten auf S. 54). Wie wir nachweisen konnten, bleibt der Priming-Effekt bei jeder Schreibweise erhalten. Die unterschwellige Testzahl erreicht folglich ein Niveau der mentalen Repräsentation, das von ihrer visuellen Form unabhängig ist – eine abstrakte Codierung, bei der nur noch die symbolisierte Menge von Bedeutung ist.

Konflikte mit dem Denken

Unsere Experimente stehen in einer längeren Tradition. Schon seit den 1970er Jahren stehen den Psychologen solche Testverfahren zur unterschwelligen, subliminalen Wahrnehmung zur Verfügung. Mittlerweile haben sie bei Gesunden unbewusste kognitive Vorgänge belegt, die ganz verschiedene Arten und Niveaus der Repräsentation betreffen: darunter die visuelle Form, die Schreibweise und den Klang von Wörtern, den emotionalen Gehalt von Bildern oder den Bedeutungsgehalt bestimmter Reize wie Zahlen oder gezeichneter Objekte. Demnach scheinen die meisten Typen mentaler Repräsentationen unbewusst zugänglich zu sein, das heißt, keine davon ist ausschließlich mit bewusster Verarbeitung assoziiert.

Die Versuche zur unterschwelligen Wahrnehmung lieferten alles in allem drei wesentliche Erkenntnisse. Die erste lautet: Unbewusste Repräsentationen bestehen nur sehr kurz. Anthony Greenwald und seine Kollegen von der Universität von Washington in Seattle variierten den Zeitabstand zwischen Test- und Zielreiz und wiesen so nach, dass die Priming-Wirkung des ersten nach rund einer Hundertstelsekunde abklingt. Dies unterstreicht den flüchtigen Charakter der unbewussten Repräsentationen. Soll die mentale Verfügbarkeit länger anhalten, muss sie bewusst sein.

Die zweite wesentliche Erkenntnis lautet: Unser Gehirn kann zwar eine beträchtliche Anzahl mehr oder weniger abstrakter Arten von Repräsentationen unbewusst aktivieren; bestimmte Manipulationen damit scheinen aber nur möglich, wenn die Informationen bewusst zugänglich sind. Diesen Grundsatz veranschaulicht eine Versuchsreihe, die Phil Merikle und seine Kollegen von der Universität Waterloo (Kanada) 1995 durchführten.

IN KÜRZE

- Das wohl faszinierendste Forschungsgebiet der Neurobiologie dreht sich um die Frage, wie Bewusstsein entsteht. Ein Zugang führt über **das Unbewusste**.
- Mit **wahrnehmungspsychologischen Experimenten** und **moderner Neurobildgebung** untersuchen Forscher, wie unser Gehirn auch ohne unser Wissen Informationen aufnimmt und verarbeitet.
- Anhand der Erkenntnisse konnten sie ein allgemeines Modell unbewusster, aber auch **bewusster Informationsverarbeitung** entwickeln.

Wie maskierte Reize wirken

Die Versuchspersonen bekommen gut sichtbar eine so genannte Zielzahl zwischen eins und neun präsentiert, hier gerade die arabische Ziffer 4. Sie sollen schnellstmöglich entscheiden, ob diese größer oder kleiner als fünf ist und entsprechend einen linken oder rechten Knopf drücken. Ein Computer registriert die Reaktionszeiten und die Anzahl der Fehlversuche (linkes Bildpaar). Im Vergleichsversuch (rechtes Bildpaar) geht der Zielzahl eine »maskierte« Ziffer voraus. Diesen so genannten Testreiz, hier gerade die Ziffer 2, nimmt man nicht bewusst wahr, weil er sehr kurz zwischen eine Folge von beispielsweise geometrischen Mustern als Bildmaske eingeblendet wird (nicht dargestellt). Das Gehirn nimmt ihn aber unterschwellig wahr und verarbeitet ihn. So antworten die Versuchsteilnehmer schneller, wenn Test- und Zielzahl beide kleiner oder beide größer sind als fünf; liegt eine der beiden Zahlen darunter und die andere darüber, dauert es bis zur Antwort länger. Fachleute sprechen von unbewussten Priming-Effekten, nach dem englischen Begriff für Instruktion, Vorbereitung.









JEAN-MICHEL THIRIET

Hierbei boten die Forscher zunächst in zufälliger Folge rote und grüne Vierecke dar, und ihre Versuchspersonen mussten immer so schnell wie möglich die Farbe nennen. Jedem Viereck ging ein diesmal bewusst wahrnehmbarer Hinweisreiz in Form des geschriebenen Wortes »rot« oder »grün« voraus, wobei die Schriftfarbe neutral war. In dieser Situation tritt der nach seinem Entdecker benannte Stroop-Effekt auf: Die Probanden antworten schneller, wenn die Bedeutung des Hinweisworts und die Farbe des Zielreizes übereinstimmen, wie bei der Kombination »grün« – grünes Viereck.

Im inkongruenten Fall, etwa bei der Folge »grün« – rotes Viereck, lässt die Entscheidung länger auf sich warten. Dieses Phänomen beruht auf einem Konflikt zwischen zwei unterschiedlichen Anforderungen: einem automatischen Prozess – dem Lesen des Worts – und einem Denkvorgang, der selektive Aufmerksamkeit erfordert, hier dem Unterdrücken der Information aus dem Farbwort zugunsten der Farbe des Vierecks. Dass das einmal erlernte Lesen im Gegensatz zu kontrollierten, von der Konzentration abhängigen Verarbeitungsprozessen völlig von selbst abläuft, weiß jeder Erwachsene aus eigener Erfahrung: Wir lesen ganz unweigerlich alles, was uns unter die Augen kommt.

Dann kam die zweiten Phase des Versuchs: Die Forscher erhöhten den Anteil der nicht kongruenten Wort-Farb-Kombinationen auf 75 Prozent. Die Probanden änderten nun ganz von selbst ihre Strategie. Sie stellten sich darauf ein, die mit dem Wort assoziierte Reaktion zu unterdrücken und immer das Gegenteil zu antworten. Zum Beispiel machten sie sich bereit, »rot« zu antworten, wenn sie »grün« lasen. Dadurch reagierten sie jetzt in nicht kongruenten Fällen schneller als in kongruenten.

Das Unbewusste – keine Vollautomatik

Wir haben es hier mit einem inversen Stroop-Effekt zu tun. Das Interessante daran: Merikle hat diese strategische Umkehrung nur dann beobachtet, wenn die Versuchspersonen den Hinweisreiz bewusst erfassten, wenn er also für die Wahrnehmung genügend lange auf dem Bildschirm erschien. Wurde der Reiz dagegen unterschwellig dargeboten, beschleunigte er nur die Antwort, wenn er passte. Man erhielt wieder den klassischen Stroop-Effekt – selbst wenn die Versuchsreihe mehrheitlich nicht kongruente Paare umfasste. Wie dieses Beispiel illustriert, sind wir nur dann fähig, eine neue Strategie zu entwickeln und automatische Vorgänge zu unterdrücken, wenn uns die betreffenden Informationen in bewusster Form zur Verfügung stehen.

Kommen wir nun zum dritten gemeinsamen Charakteristikum subliminaler Prozesse. Anders als lange gedacht, spiegelt der Effekt maskierter Testreize nicht zwangsläufig ein völlig automatisches Verarbeiten wider. Vielmehr hängt er von der Aufmerksamkeit der Versuchspersonen ab. So konnten wir zeigen, dass ein maskierter, »unsichtbarer« Testreiz keinerlei Priming mehr bewirkt, wenn der Proband sich nicht vorweg auf das Zeitfenster konzentrieren kann, in dem Test- und Zielreiz kurz hintereinander erscheinen. Die Kanäle zur unbewussten Verarbeitung müssen also von der Versuchsperson beim Erwarten des sichtbaren Zielreizes durch Aufmerksamkeit – und damit bewusst – bereitgestellt werden.

Psychologen interessieren sich zwar vor allem für das unbewusste Verarbeiten von Wörtern, Zahlen und Zeichnungen. Bei etlichen Untersuchungen geht es aber auch um Gesichter, einen Reiz mit hohem emotionalem Gehalt. Seit Langem weiß man, dass bei der Analyse die- ▷

▷ ser Gefühle eine kleine Hirnregion – der Mandelkern – eine entscheidende Rolle spielt. Er gehört zum so genannten limbischen System. Je intensiver die Emotionen, desto aktiver wird der Kern. Dabei reagiert er offenbar empfindlicher auf Furcht als auf Freude.

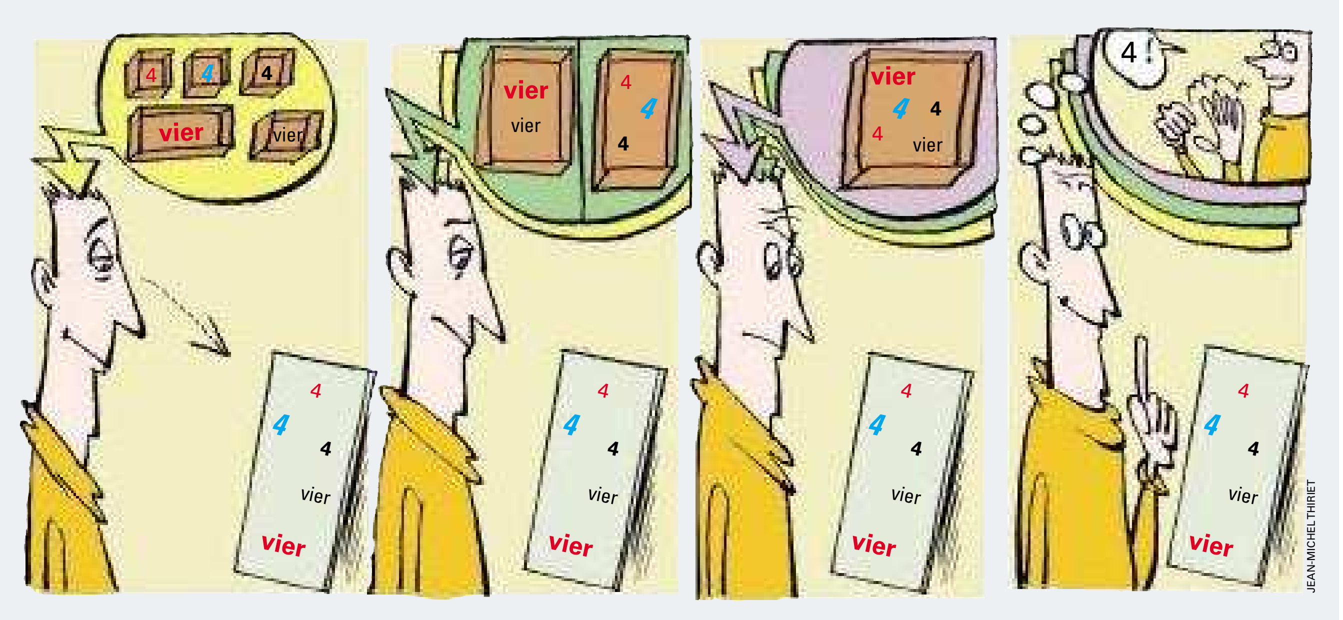
Im Jahr 1998 untersuchten Paul Whalen und seine Kollegen an der Universität von Wisconsin in Madison, auf welchen anatomischen Grundlagen oder »Korrelaten« die unbewusste Wahrnehmung von Gesichtern im Gehirn beruht. Sie nutzten als bildgebendes Verfahren die funktionelle Kernspintomografie, auch funktionelle Magnetresonanztomografie genannt, die indirekt die Hirnaktivität erfasst. Jeder Proband bekam Fotos menschlicher Gesichter mit neutralem Ausdruck präsentiert, und zwar lange genug, um sie bewusst wahrzunehmen. Vor jedem dieser Bilder wurde für nur 33 Millisekunden ein Gesicht eingeblendet, das ein starkes Gefühl von Furcht oder Freude ausdrückte. Wie die Versuchspersonen versicherten, sahen sie einzig das neutrale Antlitz; der maskierte emotionsgeladene Testreiz entging ihrer bewussten Wahrnehmung. Dennoch sprang der Mandelkern auf die unterschwellig präsentierten Gesichter an, und dabei erwartungsgemäß vor allem auf diejenigen, die Furcht ausdrückten.

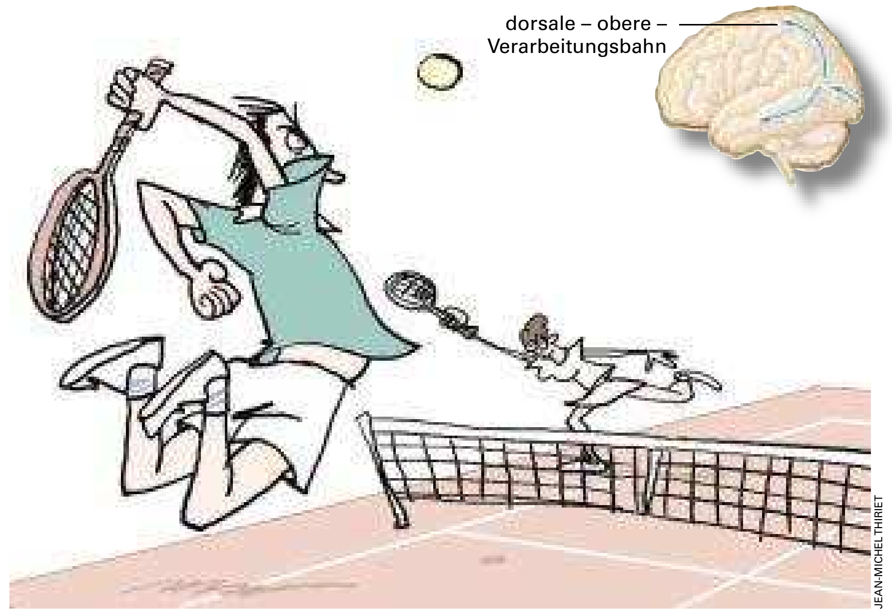


Eine Arbeitgruppe um John Morris am Institut für kognitive Neurowissenschaften in London fand dann Entsprechendes, ebenfalls per funktioneller MRT. Bei ihren Versuchen reagierte der Mandelkern in der rechten Hirnhälfte auf unterschwellig präsentierte Gesichter, die Angst zeigen. 1999 konnte die Gruppe zudem nachweisen, dass bei diesem unbewussten Wahrnehmungsvor-

Wie Zahlen mental repräsentiert werden

Eine visuelle Information kann im Gehirn auf verschiedenen Codierungsniveaus repräsentiert werden. Auf einer ersten Ebene ist sie in Form der Raumkoordinaten der Objekte verschlüsselt – in diesem Fall der Geometrie und Kontur der Ziffer 4 und des Worts vier. Jedes Objekt steht für sich und wird in der ihm eigenen Weise im Gehirn dargestellt. Danach werden die Ebenen immer abstrakter, repräsentieren beispielsweise die Zahlen unabhängig von ihrer Farbe, Größe, Form oder Orientierung nur nach der Schreibweise, also als arabische Ziffer oder als Zahlwort. Noch ein Abstraktionsniveau höher werden 4 und Vier als zwei Versionen einer einzigen lexikalischen Einheit erkannt. Die letzte Stufe schließlich repräsentiert die Zahlen nur noch semantisch, also in ihrer Bedeutung: als Menge vier, die zwischen der von drei und fünf liegt.





JEAN-MICHEL THIRIET

Jeder visuelle Eindruck, der in der Sehregion am hinteren Pol im Gehirn einläuft, wird über zwei Routen gleichzeitig weiterverarbeitet (Hirnbild). Die Informationen, die über den unteren Weg fließen, dienen dazu, Objekte zu identifizieren. Mit ihrer Hilfe finden wir beispielsweise einen Tennisball zwischen verschiedenem anderem Kram (ganz links). Manches, was der untere Pfad codiert, bleibt jedoch unbewusst. Die visuellen Informationen der oberen Route dienen dazu, unsere Bewegungen zu steuern, etwa bei einem Tennisspiel. Hierbei wird automatisch unsere Position zum Ball berücksichtigt, dessen Geschwindigkeit und unsere Eigenbewegung (links).

gang ein Pfad aktiviert wird, der über die vorderen Hügel der so genannten Vierhügelplatte verläuft. Diese Hirnstruktur befindet sich im oberen Stockwerk des Mittelhirns und verkörpert eine Verarbeitungsinstanz unterhalb der Hirnrinde. Es gibt also sehr wohl – hier mit Gefühlen verbundene – höhere Prozesse, die ablaufen, ohne dass wir uns dessen bewusst wären.

Diese Verhältnisse sind noch mit dem klassischen hierarchischen Modell des Gehirns vereinbar, das der englische Nervenarzt Hughlings Jackson im 19. Jahrhundert aufstellte. Er ging davon aus, dass Bewusstsein auf der Funktion der Hirnrinde, des Cortex, beruht, während tiefer liegende Strukturen wie die Vorderhügel und entwicklungsgeschichtlich ältere wie die Mandelkerne unbewusst Dinge verarbeiten. Wie eine Reihe von Ergebnissen aus den 1990er Jahren zeigte, muss Jacksons Hypothese trotzdem präzisiert werden: Offensichtlich gehen nicht alle Aktivitäten im Cortex stets mit Bewusstsein einher.

Hierzu ein Beispiel: Bei unserem »größer oder kleiner fünf«-Experiment reagierte die motorische Hirnrinde der Probanden bereits auf die unterschwellige Testzahl mit einer beträchtlichen Aktivierung. Sollten die Teilnehmer beispielsweise bei einer Zielzahl größer fünf mit der linken Hand den linken Knopf drücken, und wurde ihnen »9« als maskierte Testzahl präsentiert, versetzten sie unbewusst die motorische Hirnrinde der rechten Hirnhälfte in Bereitschaft, die diese Hand steuert. Obwohl die Probanden die Testzahl nach eigenem Bekunden gar nicht wahrnahmen, sah ihr Gehirn also eine Reaktion vor. Demnach können die motorischen Regionen, die bei bewussten Handlungen in Aktion treten, auch unbewusst mobilisiert werden. Anders gesagt: Ihre Aktivierung geht nicht unbedingt mit dem Programmieren und Ausführen bewusster Handlungen einher, und folglich trägt nicht jede Aktivität in der Hirnrinde automatisch zum Bewusstseinsinhalt eines Menschen bei.

Unten nur bewusst – oben unbewusst?

Wie sind diese Erkenntnisse nun in einen theoretischen Rahmen einzuordnen? Seit den Arbeiten von Leslie Ungerleider und Mortimer Mishkin vom National Institute of Mental Health in Bethesda (Maryland) Anfang der 1980er Jahre geht man davon aus, dass es für die weitere Verarbeitung von Seheindrücken zwei untereinander quervernetzte Hauptbahnen gibt:

- Die so genannte ventrale – untere – Route erstreckt sich von Sehregionen des Hinterhauptlappens bis zu Arealen vorne unten im Schläfenlappen (siehe kleines Hirnschema in den Abbildungen oben). Oft auch als »Was«-Schiene bezeichnet, finden entlang diesem Weg in der Hirnrinde immer abstraktere visuelle Erkennungsprozesse statt, die uns Objekte zu identifizieren erlauben, und zwar unabhängig von deren Größe, Position oder Orientierung im Raum.
- Die obere – dorsale – Route verläuft von den hinteren visuellen Regionen bis in die Hirnrinde der Scheitellappen. Diese auch als »Wo«- oder »Wie«-Schiene bezeichnete Bahn wickelt kurz gesagt unsere motorische Interaktion mit den visuellen Objekten unserer Umwelt ab. Sie ist beispielsweise gefragt, wenn wir Tennis spielen.

Noch immer gehen zahlreiche Experten explizit von einer Dichotomie zwischen Bewusstem und Unbewusstem aus, die zwar an die alte Sicht von Jackson erinnert, aber nicht dessen anatomische Arbeitsteilung zwischen Cortex und subcorticalen Regionen übernimmt. So postulieren David Milner von der Universität Durham in Großbritannien und Melvyn A. Goodale von der Universität West-Ontario in London (Kanada), die »pragmatische« und »schnelle« obere Route des Sehsystems arbeite, ohne dass uns die Ergebnisse der entsprechenden Verarbeitung bewusst werden. Visuelles Bewusstsein entspringe hingegen der neuronalen Aktivität der unteren Route.

Es gilt jedoch, bei dieser unter Neurowissenschaftlern noch recht verbreiteten Ansicht genauer zu differenzieren. Das zeigen wiederum Versuche mit maskierten visuellen Reizen. So präsentierte die Arbeitsgruppe von Edmund Rolls an der Universität Oxford Affen Bilder von Gesichtern. Gleichzeitig erfasste sie mit Elektroden die Reaktion bestimmter Nervenzellen im Gehirn. Trotz subliminaler Darbietung sprangen so genannte Gesichtsneuronen in einem unteren Bereich des Schläfenlappens an. Dieses inferiotemporale Areal der Hinrinde ist Teil der ventralen visuellen Route. Einschränkend muss man jedoch sagen, dass die Reaktion der Zellen schwächer und ▷

kürzer ausfiel als bei normaler Präsentation derselben Gesichter.

In neuerer Zeit konnten auch wir etwas zu diesem Thema beitragen: indem wir beim Menschen die Cortexbereiche der ventralen Route eingrenzten, die unbewusst aktiv werden können. Wie bildgebende Verfahren verrieten, werden maskierte gelesene Worte im so genannten fusiformen Gyrus verarbeitet, einer Windung im unteren Bereich von Schläfen- und Hinterhauptslappen. Bei der entsprechenden Studie verglichen wir, welche Hirnregionen beim Lesen eines sichtbaren Worts anspringen und welche durch die unterschwellige Wahrnehmung desselben Worts in Aktion treten (siehe Abbildungen rechts). Schon die maskierten Wörter aktivierten Teile eines Hirnnetzwerks, die bei der visuellen Verarbeitung und wahrscheinlich bei der phonologischen Codierung, also der Vorbereitung des Aussprechens, eine Rolle spielen. Bestimmte Regionen im Scheitel- und Stirnlappen traten dagegen nur dann in Aktion, wenn das Wort bewusst wahrgenommen wird.

Code-Knacken durch Wiederholung

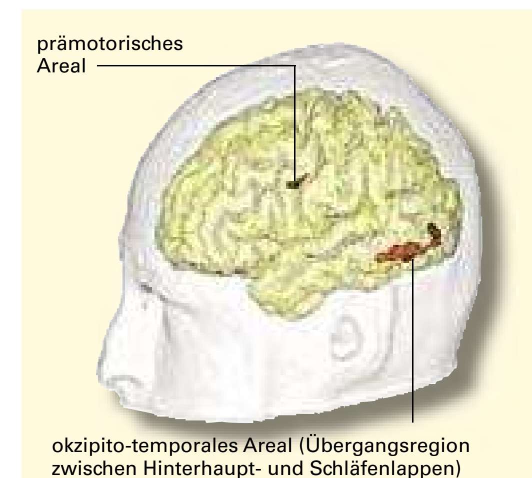
Angesichts dieser und ähnlicher experimenteller Daten lässt sich die Theorie einer Zweiteilung zwischen unbewussten »dorsalen« und bewussten »ventralen« Vorgängen bei der visuellen Wahrnehmung nicht halten. Obwohl Aktivitäten der ventralen Route höheren kognitiven Prozessen entsprechen, können sie sich unserem Bewusstsein entziehen. Bei deutlich stärkerer Aktivierung geht aber die Informationsverarbeitung dort anscheinend eher mit einer bewussten Erfahrung einher. Die ventrale Route ist dabei keineswegs für sich allein das »Zentrum« unseres visuellen Bewusstseins. Es müssen offenbar noch andere, weiter entfernte Hirnregionen im Zusammenspiel anspringen.

Bislang haben wir gewisse neurale Korrelate der unbewussten Wahrnehmung beschrieben – was aber ist mit dem Korrelat des unbewussten Primings? Es blieb bis in die 1990er Jahre rätselhaft. Weiter half dann eine Entdeckung von Robert Desimone vom Labor für Neuropsychologie des amerikanischen National Institute of Mental Health und Earl Miller vom Department of Brain and Cognitive Sciences des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. Als die Forscher die Aktivität einzelner Nervenzellen im unteren Schläfenareal von Affen aufzeichneten, bemerkten sie, dass einige Neuronen umso schwächer reagieren, je häufiger der visuelle Reiz wiederkehrt. Dabei spielte es keine Rolle, ob man Größe, Orientierung oder eine Reihe anderer Parameter des Objekts veränderte: Die neuronale Antwort ging in derselben Weise zurück. Dieser Effekt – Wiederholungssuppression genannt – schien somit zu signalisieren, dass irgendeine Hirnregion Informationen auf einer objektbasierten Ebene neuronaler Codierung handhabt.

Wie sich dann dank bildgebender Verfahren bei Priming-Experimenten mit identischen Test- und Zielreizen herausstellte, zeigen beim Menschen zahlreiche Hirnregionen diesen Effekt. Dazu gehören der Übergangsbereich zwischen Hinterhaupt- und Schläfenlappenrinde, die Insula (eine Rindenregion, die sich in der Grenzfurche des Schläfenlappens zum Stirn- und Scheitellappen verbirgt), der Scheitellappen, der Präfrontalcortex, der Sehhügel (Thalamus) im Zwischenhirn und weitere graue zentrale Kerne. Die Wiederholungssuppression schien ein verbreitetes Hirnphänomen zu sein, das aus der Codierungsspezifität der Nervenzellen resultiert.

Seitdem nutzen Forscher den Effekt, um zu bestimmen, in welcher Form das Gehirn wahrgenommene Informationen codiert. An Nervenzellen, die derart auf einen gegebenen wiederholten Reiz reagieren, erkennen sie zunächst, dass ihn die Region verarbeitet. Wenn die Funktion dieser Region bekannt ist, kann man ableiten, wie der Reiz dort codiert wird. Auf diese Weise lässt sich am Ende der neuronale Code des Menschen knacken.

Die unterschwellige Wahrnehmung eines gedruckten Worts aktiviert Regionen entlang dem ventralen visuellen Pfad, die auf die Analyse der so genannten visuellen Wortform spezialisiert sind. Eine weiter vorne gelegene aktive Zone hilft wahrscheinlich mit, die Aussprache des Worts vorzubereiten. Wird dasselbe Wort bewusst gelesen, reagieren diese Areale sehr viel stärker; zusätzlich tritt eine Reihe weiterer Hirnregionen in Aktion, die ein weitläufiges Netzwerk bilden. Auf den unteren Bildern steigt die Aktivierung von blau nach rot.





Genau mit dieser Vorgehensweise haben wir auch nachgewiesen, wo die unbewusst wahrgenommenen Testzahlen verarbeitet wurden, wenn es um den Vergleich »größer oder kleiner fünf« ging. Wir entdeckten nämlich Indizien für eine Wiederholungssuppression bei identischer Test- und Zielzahl – und zwar unabhängig von der Schreibweise der beiden (»vier – 4« funktionierte beispielsweise ebenso wie »4 – 4«). Sie fanden sich in einer Rindenregion, die bekanntermaßen Zahlen in abstrakter Form codiert: als die Menge, für die sie stehen.

Mit derselben Methode haben wir auch überprüft, wo im Gehirn die so genannte visuelle Wortform repräsentiert wird. Hierzu mussten unsere Versuchspersonen Zielwörter wie Löwe oder Radio als natürliche beziehungsweise künstliche Objekte klassifizieren – wieder per linkem oder rechtem Knopfdruck. Dem Zielwort ging ein maskiertes Testwort voraus, entweder in Klein- oder Großbuchstaben geschrieben. Wie erwartet reagierten die Teilnehmer schneller, wenn ein identisches Testwort vorausging, und zwar unabhängig von der Schreibweise. Mit Hilfe der funktionellen MRT haben wir hierbei in einem Bereich der linken unteren Schläfenlappenrinde eine Wiederholungssuppres-



bewusste Wahrnehmung



L. NACCACHE UND S. DEHAENE

sion beobachtet. Seit den anatomisch-klinischen Arbeiten des französischen Neurologen Joseph Jules Dejerine im 19. Jahrhundert vermutet man, dass das betreffende Areal – die visuelle Wortformregion – eine Schlüsselrolle bei der Analyse von Buchstabenreihen spielt.

Globalisierung im Gehirn

Die unabhängig von der Schreibweise auftretende Wiederholungssuppression entspricht auf Verhaltensebene dem Priming-Effekt. Wie es also aussieht, springt bei einem gegebenen kognitiven Prozess – zum Beispiel der mentalen Repräsentation einer Buchstabenfolge in Gestalt eines Worts – immer dasselbe Neuronenmodul an, ob das Ganze nun bewusst abläuft oder nicht. Verarbeitet wird ein unterschwellig bemerkter Reiz demnach auf demselben Weg wie sein wissentlich bemerktes Pendant.

Allerdings zeichnet sich die bewusste Wahrnehmung gegenüber der unbewussten in zweierlei Hinsicht aus: Bei ihr werden die betreffenden Hirnregionen stärker und anhaltender aktiviert, zudem wird im engen Zusammenhang damit ein weitläufiges Netz von Hirnarealen mobilisiert.

Aus den inzwischen verfügbaren experimentellen Daten lassen sich mehrere wichtige theoretische Konzepte ableiten, die gemeinsam bereits den Grundriss einer physiologischen Theorie des Bewusstseins bilden. In jüngster Zeit wurden in diesem Zusammenhang verschiedene Rahmenmodelle vorgeschlagen, die einander jedoch nicht widersprechen, sondern jeweils bestimmte Aspekte dieser »Physiologie des Bewusstseins« betonen.

Was unsere Gruppe angeht, hat sie gemeinsam mit Jean-Pierre Changeux vom Collège de France und Michel Kerszberg vom Institut Pasteur in Paris das Modell des »bewussten globalen Arbeitsraums« erarbeitet. Es beruht auf folgenden Überlegungen:

▶ In unserem Gehirn laufen jederzeit zahlreiche kognitive Prozesse ab, ohne dass wir auch nur das Geringste davon bemerken.

▶ Damit sie in unser Bewusstsein dringen, ist Aufmerksamkeit notwendig, aber nicht hinreichend. Denn wie erwähnt, hängt die Wirkung unterschwelliger Testreize ja davon ab, dass man sich aktiv konzentriert.

▶ Ohne das Bewusstsein einzuschalten, lässt sich eine Reihe kognitiver Aufgaben offenbar nicht erfüllen. Hierzu zählen solche, die es erfordern, dass wir längere Zeit Informationen explizit zugänglich halten, elementare mentale Arbeitsschritte neu kombinieren oder aus eigenem Antrieb zielgerichtet handeln.

Diese psychologischen Eigenschaften könnten durch die Organisationsprinzipien unseres Gehirns bedingt sein. Völlig unbemerkt verarbeiten dort zu jedem Zeitpunkt zahlreiche spezialisierte Prozessoren parallel zueinander Informationen. Die Inhalte dieser Prozesse dringen nur dann zu uns durch, wenn sich die entsprechende neuronale Aktivität, verstärkt durch unsere Aufmerksamkeit, zu einem großräumigen, kohärenten Aktivierungszustand auswächst. Auf diese Weise wird diese Information in einem Netz von Neuronen verfügbar, das sich wohl über das gesamte Gehirn erstreckt – eben jenen globalen Arbeitsraum.

Sofern die »Fernverbindung« zwischen den Nervenzellen für eine bestimmte Mindestdauer erhalten bleibt, sind die Informationen aus einer einzigen Verarbeitungsinstanz somit verschiedenen kognitiven Vorgängen zugänglich: wie Kategorisieren, Speichern im Langzeitgedächtnis, Bewerten, Entscheidungsfindung und Steuerung des willentlichen Handelns. Genau in diesem Mechanismus dürfte das gesuchte neuronale Korrelat des Bewusstseins bestehen: Wir erfahren ein Objekt dann wissentlich, wenn es in unserem Gehirn allgemein zugänglich ist.

Nach unserem Modell verändert der neuronale Raum, auf dem Bewusstsein basiert, dauernd seine Struktur und Grenzen, da dieselbe Verarbeitungseinheit manchmal für sich allein und unbewusst agiert und manchmal als Teil des globalen Arbeitsraums. Die globale Verfügbarkeit von Information würde unserem Empfinden entsprechen, wenn uns etwas nach eigenen Aussagen bewusst ist. Anatomisch gesehen bilden offenbar mehrere Regionen die unmittelbare neuronale Grundlage des Arbeitsraums: der präfrontale Cortex sowie der vordere Bereich der cingulären Windung (an der Innenseite der Hirnhälften) und die damit verbundenen Areale.

Auf der Basis dieses Modells lassen sich zahlreiche theoretische und philosophische Fragen angehen und vor allem auch der kritischen Überprüfung durch Experimente unterwerfen. Und dies erlaubt wiederum, unseren ersten noch rohen Entwurf weiter zu prüfen, zu ergänzen und zu präzisieren. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Lionel Naccache arbeitet als Neurologe und Neurophysiologe am Hospital La Pitié-Salpêtrière und ist Mitglied der INSERM-Einheit Kognitives Neuroimaging. Geleitet wird sie von **Stanislas Dehaene**, Mathematiker und Kognitionswissenschaftler. Angesiedelt ist diese Einheit am Service Hospitalier Frédéric Joliot in Orsay.

La base cérébrale de la conscience phénoménale visuelle: un approche neurologique. Von L. Naccache in: Revue Neurologique, Bd. 160, Nr. 4, S. 395, April 2004

Unconscious masked priming depends on temporal attention. Von L. Naccache et al. in: Psychological Science, Bd. 13, Nr. 5, S. 416, 2002

Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. Von S. Dehaene et al. in: Nature Neuroscience, Bd. 4, Heft 7, S. 752, 2001

Towards a cognitive neuroscience of consciousness: basic evidence and a workspace framework. Von S. Dehaene und L. Naccache in: Cognition, Bd. 79, Heft1-2, S. 1, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Das Ende der letzten Eiszeit

Einst bedeckte ein riesiger Eispanzer Nordeuropa und die Barentssee. Dann, vor etwa zehntausend Jahren, verschwanden die Eismassen plötzlich. Eine ähnliche Situation könnte nach Ansicht von Glaziologen derzeit am Südpol entstehen. Dadurch würde der Meeresspiegel um sechs Meter ansteigen.

Von Martin J. Siegert, Julian A. Dowdeswell, John-Inge Svendsen und Anders Elverhøi

Dem Amerikaner John Mercer fiel in den 1970er Jahren, als die globale Erwärmung noch längst nicht ins öffentliche Interesse gerückt war, etwas auf, das ihm Angst machte. Der Glaziologe der Ohio State University bemerkte, dass die Geografie der Westantarktis derjenigen der eurasischen Arktis in der Barentssee auffallend ähnelte: Beide polaren Regionen besitzen einen ausgedehnten, nur wenige hundert Meter tiefen Kontinentalschelf.

Der Hauptunterschied bestehe darin, machte Mercer sogleich klar, dass derzeit auf der Westantarktis eine 2,5 Kilometer dicke Eisdecke laste; dagegen sei die eurasische Arktis auf dem Meeresgrund heute vergleichsweise eisfrei. Sollte die globale Erwärmung fortschreiten, bestünde nach Mercer jedoch die reale Gefahr, dass auch der gewaltige Eispanzer der Westantarktis abschmelzen könnte. Dadurch würde den Ozeanen genügend Wasser zugeführt, um den Meeresspiegel global um sechs Meter anzuheben. Weltweit würden zahllose Küsten überflutet.

Der amerikanische Forscher wusste, was zu tun war: Um beurteilen zu können, ob die Eisdecke der Westantarktis tatsächlich bedroht ist, sollte man nach einem vergleichbaren Ereignis suchen – in den Spuren der letzten Eiszeit, die den Norden Europas und Asiens bedeckten. Seitdem befassen sich Geowissenschaftler intensiv mit diesem Problem. Ihre Arbeit erhellte bald die gesamte Geschichte der eurasischen Arktis in der letzten Eiszeit.

Mitte der 1980er Jahre deutete man die damals vorliegenden geologischen Funde noch äußerst unterschiedlich. Einige Wissenschaftler hielten es für erwiesen, dass zur Zeit des Höhepunkts der letzten Vereisung – unter Geologen als »Letztes Glaziales Maximum« oder LGM bekannt – über dem gesamten nördlichen Europa und Sibirien ein 3,5 Kilometer dicker Eispanzer lastete.

Andere bestritten dies. Sie mutmaßten, auf dem Meeresboden nördlich des norwegischen und russischen Festlands hätte es praktisch gar kein Eis gegeben. Das Problem dieser widersprüchlichen Deutungen bestand zum Teil darin, dass die geologischen Hinterlassenschaften in der Arktis manchmal nur schwer zu interpretieren waren, weshalb es zu Fehleinschätzungen kam, erschwert durch die geringe Zahl verlässlicher Beobachtungen aus der entlegenen, unwirtlichen Region.

Um diese Aufgabe zu lösen, initiierte die European Science Foundation eine Reihe von Forschungsprogrammen. Darin sollten im Umkreis der ehemaligen Eisdecken in der eurasischen Arktis neue geologische Daten erhoben werden. Mehr als 50 Wissenschaftler aus sieben europäischen Ländern beteiligten sich daran, darunter auch wir vier. Das erste Programm, Ponam (Polar North Atlantic Margins, polare nordatlantische Ränder), konzentrierte sich auf die Westseite der Barentssee.

Schnelle Eisströme am Rande

Im Verlauf des Anschlussprogramms namens Queen (Quaternary Environments of the Eurasian North, quartäre Milieus im eurasischen Norden) verlagerte sich der Schwerpunkt Richtung Osten, hin zur russischen Arktis. Beide Programme lieferten eine Menge Informationen über den Zustand des nördlichen Eurasiens während der letzten Eiszeit. Um ihre Bedeutung würdigen zu können, muss man jedoch einiges über die glaziologischen Prozesse wissen. Daher wol-

JOACHIM SCHÜRING

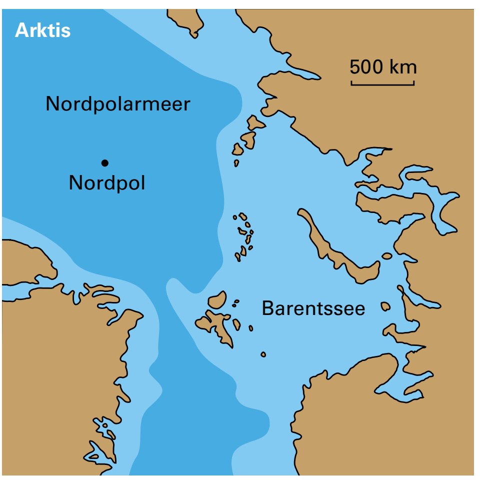
len wir kurz erläutern, wie Gletscher funktionieren.

Eis ist zwar eine feste Masse, doch unter großräumigem Druck verformt es sich langsam. Das gilt auch für den Druck, den eine Eisdecke durch ihr eigenes Gewicht erzeugt. Auf Grund dieser Eigenverformung wandert ein Eispaket allmählich innerhalb eines Gletschers. An der Oberfläche einer Eisdecke wird ein Stück Eis durch fortwährenden Schneefall begraben und in die Tiefe gedrückt. Dadurch versinkt es mit einer bestimmten Geschwindigkeit im Eis. Insgesamt ist die Bewegung in der Mitte eher abwärts gerichtet, an den Seiten stärker nach außen.

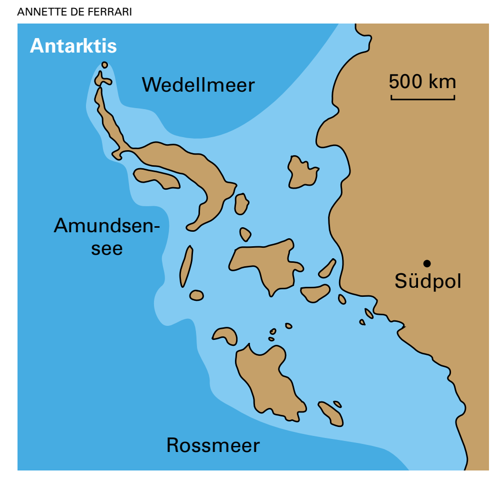
Genauer gesagt strahlt die Eisbewegung im Zentrum eines Eisschilds von der so genannten Eisscheide aus. Das ist die Linie, bei der an der Eisoberfläche keine seitliche Bewegung zu verzeichnen ist. Von der Eisscheide aus wächst die Geschwindigkeit zu den Seiten hin. Anfänglich erreicht diese vielleicht nur wenige Meter pro Jahr. An den Rändern werden Eisschilde jedoch hochwirksam von rasch fließenden Eisströmen »drainiert«, mit bis zu einigen hundert Metern pro Jahr. Diese Ströme können sich am Rand so schnell bewegen, da an der Eisbasis Schmelzwasser die Reibung herabsetzt. Dadurch kann das Eis besser über den Grund rutschen.

Der Eisstrom bewegt sich immer zügiger, bis er schließlich an sein Ende gelangt. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Die Eisdecke kann an Land zum Stillstand kommen, wenn das Eis an der Oberfläche gerade genauso schnell schmilzt, wie Nachschub kommt. Oder aber sie endet im Meer. Wo eine intakte Eisschicht in den Ozean fließt und zu ▷

▲ Treibendes Schelfeis umgibt die eisige Küste der Antarktis (oben). Sollte die globale Erwärmung solche Puffer zerstören, wäre der marine Eisschild der Westantarktis direkt dem Meer ausgesetzt. Das würde sein Abschmelzen beschleunigen, weltweit würden Küsten überflutet. Ein ähnliches Vorkommnis ereignete sich auf der Nordhalbkugel vor etwa 15000 Jahren – als sich das Eis, das einst die Barentssee bedeckte, rasch auflöste. Die Situationen ähneln sich: Der Kontinentalschelf der Barentssee (hellblau, rechts) gleicht dem in der Westantarktis, wenn dort das Eis abschmölze (unten rechts).



ANNETTE DE FERRARI



▷ treiben beginnt, entsteht so genanntes Schelfeis. Dieses verliert an Masse, indem es »kalbt«, also von seinem Rand Eisberge abbrechen, und indem es an der Basis schmilzt.

Fließen Eisschichten über Land, erodieren sie an ihrer Basis Sedimentgesteine und schleppen diese mit. Auch riesige Gesteinsbrocken können so über große Entfernungen hinweg verlagert werden. Daher liegen vor jedem Gletscher Moränen oder Sedimenthaufen, die aussehen wie roh aufeinander geschichtete Bruchsteinmauern. Schmelzen Gletscher und Eisdecken, bleiben Moränen zurück und markieren die maximale Ausdehnung des Eises. Auf den ersten Blick scheint es also ganz einfach zu sein, die Grenzen einer alten Eisdecke zu rekonstruieren – man muss nur die Lage ihrer Endmoränen kartieren. In Wirklichkeit ist die Situation komplizierter, da in einigen Gebieten Endmoränen entweder nicht vorhanden oder heute unter dem Meeresspiegel verborgen sind. Oft haben sich auch mehrere Moränen von verschiedenen Eisvorstößen miteinander verzahnt. Dann ist die gesuchte Moräne schwer von den anderen zu unterscheiden.

In den letzten Jahren haben Forscherteams zahlreiche geologische Informationen über die Eisschilde gesammelt, die zeitweise riesige Bereiche der eurasischen Arktis bedeckten. Im Wesentlichen lieferte diese Arbeit drei wichtige Ergebnisse:

- Im Verlauf des LGM, vor etwa 20 000 Jahren, bildete sich auf dem Kontinentalschelf in der Barentssee eine große, im Meer auf Grund liegende Eisdecke. Damals war die Eisschicht der Barentssee mit dem skandinavischen Eisschild vereint. Diese Eisdecke reichte von Deutschland und den Britischen Inseln über Skandinavien und den Schelf der Barentssee bis nach Osten zur Karasee.
- Rasch fließende Eisströme transportierten große Mengen glazialer Sedimente hin zum kontinentalen Rand.
- Gegen Ende der Vereisung zerfiel der Eispanzer offenbar ziemlich rasch.

Woher wir das alles wissen? Gesichert ist, dass die Barentssee in jüngster geologischer Vergangenheit vereist war. Denn der Meeresboden wird im Allgemeinen nur von wenigen Metern weichen Schlamms bedeckt. Das Sediment unter dieser dünnen Schlammschicht ist reich an Schutt glazialer Herkunft. Durch das enorme Gewicht der letzten Eisdecke wurde es stark komprimiert. Diese Sedimentschicht, bei der es sich um Tillit handelt (eine typische glaziale Ablagerung), ist auf dem Kontinentalschelf weit verbreitet. In den zentralen Teilen der Barentssee hinterließ die Eisdecke auch eine Serie langer, paralleler Rinnen, die ehemalige Eisbewegungen widerspiegeln. Um die Ausmaße und das Alter dieser Eisdecke abzuschätzen, untersuchten wir die Barentssee sowie den Nordrand des eurasischen Kontinents.

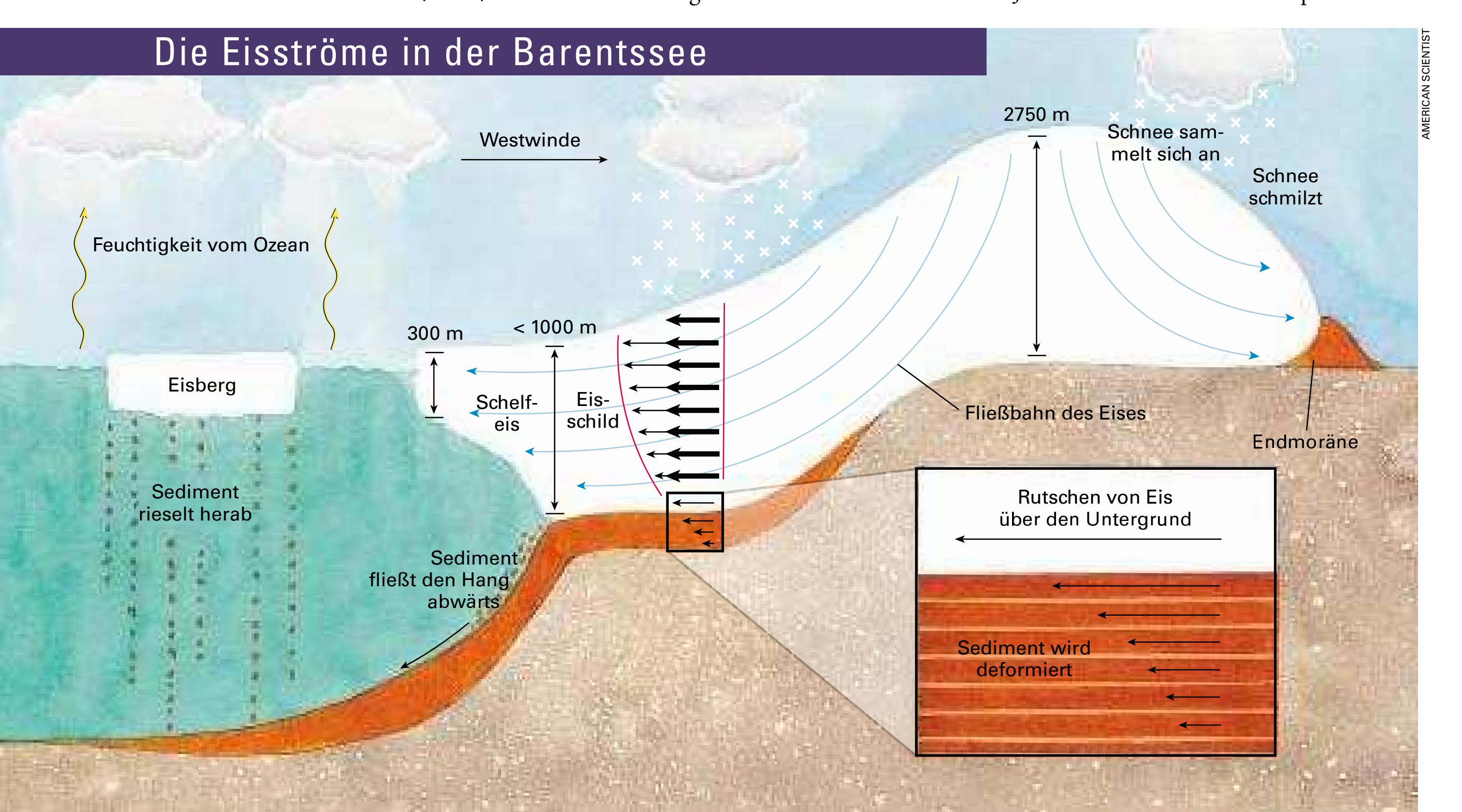
Ufer, die nach oben schnellen

Wir begannen mit geologischen Geländestudien auf Spitzbergen, einer Inselgruppe 600 Kilometer nördlich des skandinavischen Festlands. Das Muster gehobener Küstenlinien auf diesem Archipel und auf dem weiter östlich gelegenen Franz-Josef-Land verriet uns, dass die nördliche Barentssee im Verlauf des LGM durch ein schweres Gewicht, des Eis, nach unten gedrückt worden war. Solche gehobenen Küstenlinien entstehen in zwei Schritten: Zuerst schafft die Brandung an den Stränden flache Bereiche. Sobald die Eisdecke abschmilzt, schnellt das Ufer nach oben und verwandelt diese Strände in gehobene Terrassen.

Entlang der Westküste Spitzbergens entdeckten Forscher solche angehobenen Strände gespickt mit Muscheln und Walknochen; mit Hilfe der Radiokarbonmethode wurde ihr Alter auf über 40 000 Jahre datiert. Die meisten Experten nah-

▼ **Die blauen Pfeile zeigen, wie am Höhepunkt der letzten Eiszeit das Eis der Barentssee durch den Eispanzer strömte. Ganz rechts, an der Südgrenze des Eisschilds hat sich eine Endmoräne gebildet. Ganz links, an den nördlichen und westlichen Grenzen des Eisschilds, entsteht ein Gebiet mit Schelfeis. Etwas landeinwärts davon befindet sich der marine Teil des Eisschilds – der Teil, der auf Felsgrund unterhalb des Meeresspiegels ruht. Hier fließt das Eis relativ schnell (Pfeile).**

Die Eisströme in der Barentssee

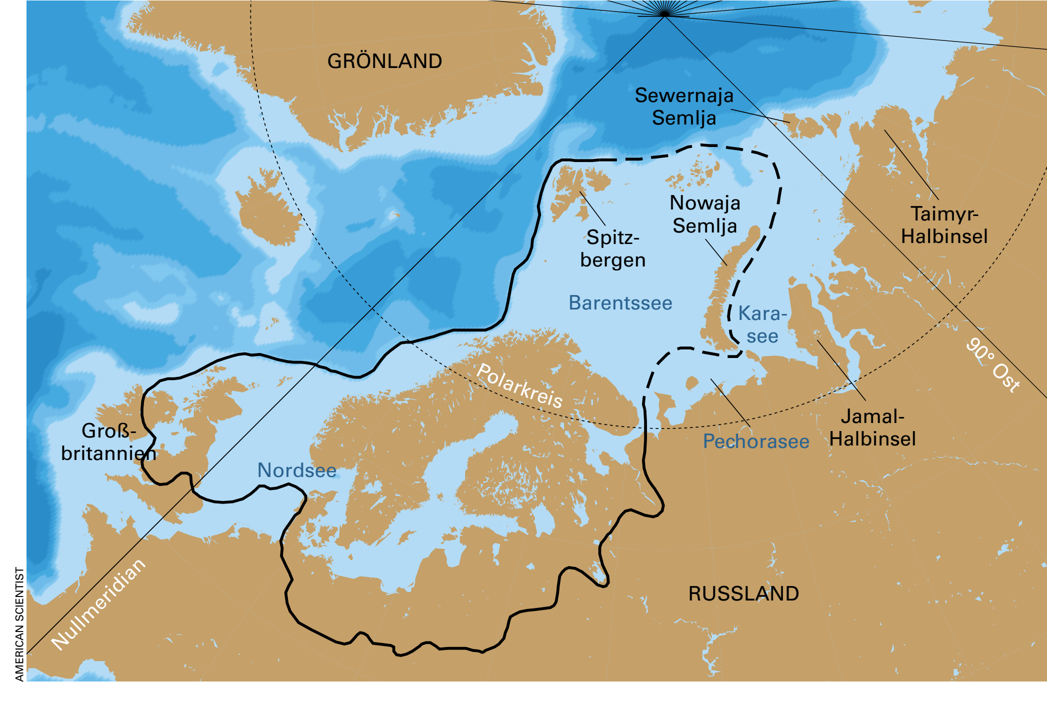


AMERICAN SCIENTIST

men dies zuerst als Beleg dafür, dass nach Entstehung der angehobenen Strände Gletscher diese Küste nicht mehr erreicht haben können. Dann aber gelang Jan Mangerud, einem Geologen von der norwegischen Universität Bergen, eine bahnbrechende Entdeckung: Zumindest auch einige der alten, gehobenen Strände müssen von Eis überfahren worden sein. Das legt nahe, dass während des LGM die Gletscher viel größere Teile Spitzbergens bedeckten als bislang angenommen.

Offenbar waren damals die wichtigsten Fjorde tatsächlich zeitweise mit Eis gefüllt. Auch den gesamten Archipel hatte offenbar eine Eisschicht bedeckt, deren Zentrum sich östlich von Spitzbergen befand. Um festzustellen, wo exakt nun die Westgrenze dieser Eisdecke verlief, kartierten die Forscher die Sedimente des Meeresbodens quer über den westlichen eurasischen Kontinentalrand hinweg. Dazu benutzten sie seismische und akustische Messungen und zogen Bohrkerne. So bargen sie große Mengen glazialer Sedimente, die entlang dem Kontinentalhang in gewaltigen Schwemmfächer-Komplexen angeordnet sind. Die oberste Schicht dieser Sedimente stammt von der letzten größeren Vereisung. Daher markieren sie eindeutig die westliche Grenze der ehemaligen Eisdecke am Rand des Kontinentalschelfs. Die riesige Menge an Material, die zu diesen Schwemmfächern transportiert wurde, belegt, dass an der Westseite der Eisdecke schnell fließende Eisströme aktiv gewesen sein müssen.

Schwieriger war es, den südlichen und östlichen Rand der ehemaligen Eisdecke zu rekonstruieren. Ende der 1970er Jahre stellte der bekannte Geograf Mikhail Grosswald eine Hypothese auf, wonach während des LGM eine 3,5 Kilometer mächtige Eisdecke große Teile der europäischen Arktis und Sibiriens bedeckt haben sollte. Diese Vermutung, von russischen Kollegen sogleich kritisch betrachtet, wurde aber von zahlreichen westlichen Forschern rasch übernommen. Zwischenzeitlich suchte Valery Astakhov, Geologe am Nationalinstitut für geologische Fernerkundungsmethoden in Sankt Petersburg, im Permafrostboden Westsibiriens nach versteckten Überresten des letzten Eisschilds. Er bestätigte zwar, dass eine Eisdecke mit Zentrum auf dem Kontinentalschelf der Karasee nach Süden über das Tal des Jenissei hinweg vorgerückt war – jedoch lange vor dem LGM. Damit war klar, dass mit Grosswalds Hypothese etwas nicht stimmen konnte.



Seine größte Ausdehnung hatte das Eis vor etwa 20000 Jahren (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie zeigt an, wo der Eisrand nicht eindeutig ist.

Untersuchungen im Rahmen des Queen-Programms ergaben dann, dass ein frisch aussehender Moränengürtel im europäischen Teil der russischen Arktis (östlich des Weißen Meeres) tatsächlich schon vor 60000 Jahre abgelagert wurde – also bereits 40000 Jahre vor dem Eiszeitmaximum. Um den Eisrand zur Zeit des LGM zu lokalisieren, war es deshalb wieder einmal notwendig, den Blick in Richtung Meer zu wenden.

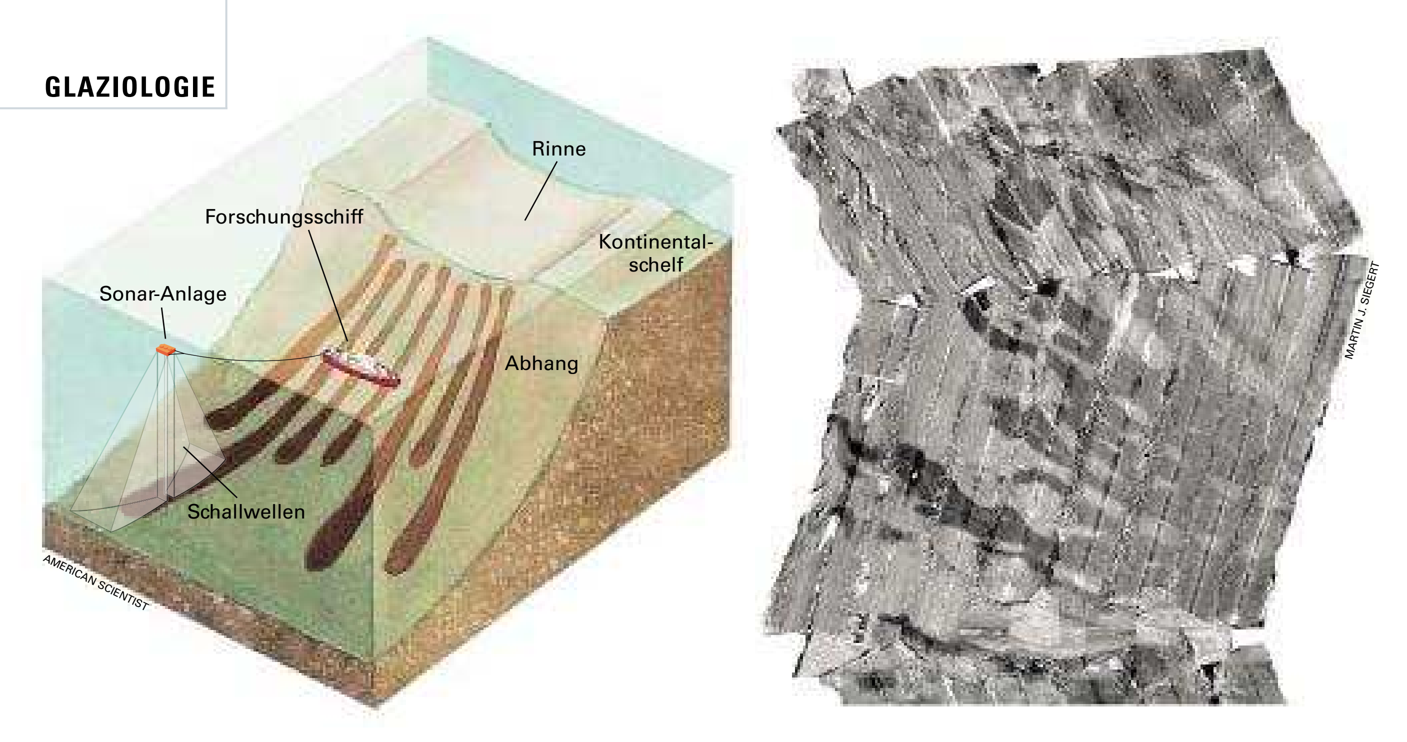
Stoßzähne von Mammuts zeigen, wo Eiszeitgletscher ihre Grenzen haben

Wir untersuchten die Sedimente auf dem Meeresboden vor dem russischen Festland und stellten fest, dass die jüngste Eisdecke am Kontinentalschelf endete. Aus der Pechorasee entnommene Bohrkerne bewiesen außerdem, dass während der letzten 40000 Jahre in diesem Gebiet die marine Sedimentation ununterbrochen angedauert hatte. Dagegen sind die ältesten Ablagerungen an der Oberfläche des Tillits – innerhalb der angenommenen Grenzen der Eisdecke – keine 14000 Jahre alt. Auch auf der Jamal-Halbinsel, die in die Karasee hineinragt, wurden keine Spuren der Eisdecke entdeckt. Daher muss sich die Südgrenze der Eisdecke irgendwo weiter nördlich befunden haben, etwa im Flachwasser der Karasee.

Die Lage des Ostrands der Eisdecke herauszufinden gestaltete sich ähnlich schwierig. Dazu untersuchten wir sedimentäre Ablagerungen in den vielen mit Seen gefüllten Becken der Taimyr-Halbinsel östlich der Karasee. Bei den Sedimenten, die sich auf dem Grund der Seen ablagerten, handelt es sich vorwiegend um feinkörnige »Mudde« (Schlamm mit hohem Anteil organischen Materials). Hätte über dieser Halbinsel einst eine Eisdecke gelastet, wären diese Sedimente durch grobkörniges Material glazialer Herkunft ersetzt oder von ihnen überdeckt worden. Die Sedimente in diesen Seen dokumentieren jedoch, dass sich nichtglaziale Sedimente ohne Unterbrechung während des gesamten LGM abgelagert hatten. Das bedeutet: Als weiter westlich, über der Barentssee und der Karasee, eine Eisdecke lag, war die Taimyr-Halbinsel weit gehend eisfrei.

Auf Sewernaja Semlja, einer Inselgruppe nördlich der Taimyr-Halbinsel, stießen russische Forscher auf Mammut-Stoßzähne, die zwischen 25000 und 19000 Jahre alt waren. Das beweist die erstaunliche Tatsache, dass die Gletscher auf diesem Archipel während des LGM sogar eine geringere Ausdehnung besaßen als heute. Damit ließ sich die Ostgrenze der ehemaligen Eisdecke also nicht eindeutig bestimmen.

Um die Glazialgeschichte der eurasischen Arktis während der letzten Eiszeit im Detail zu begreifen, muss man wissen, warum Eiszeiten überhaupt auftreten. Im Verlauf der letzten 2,7 Millionen Jahre entstanden in der eurasischen Ark- ▷



▷ tis wiederholt gewaltige Eisdecken – und zerfielen wieder. Das letzte Interglazial, in dem das Klima der Erde mit dem gegenwärtigen vergleichbar war, dauerte von 128 000 bis 115 000 Jahre vor heute. Ihm folgte eine Eiszeit, die vor 11 700 Jahren ziemlich plötzlich zu Ende ging. Während dieser Eiszeit rückten die Gletscher dreimal vor und zogen sich erneut zurück. Die jüngste Eisdecke, die das Kontinentalschelf überdeckte, entstand vor etwa 30 000 Jahren und erreichte ihre maximale Ausdehnung vor ungefähr 20 000 Jahren.

Während einer Eiszeit werden gewaltige Wassermengen von den Ozeanen hin zu den polaren Eisdecken verlagert. Dadurch sinkt der Meeresspiegel weltweit um bis zu 120 Meter. Den besten Beweis für diese großräumige Umverteilung von Wasser liefern die drei natürlich vorkommenden Sauerstoffisotope (O-16, O-17 und O-18). Warum verraten diese Sauerstoffisotope so viel? Wasser, das die leichteste Form von Sauerstoff (O-16) enthält, verdampft schneller als Wasser mit den schwereren Isotopen (O-17 und O-18). Daher wandert in die Eisschichten bevorzugt Wasser mit leichtem Sauerstoff.

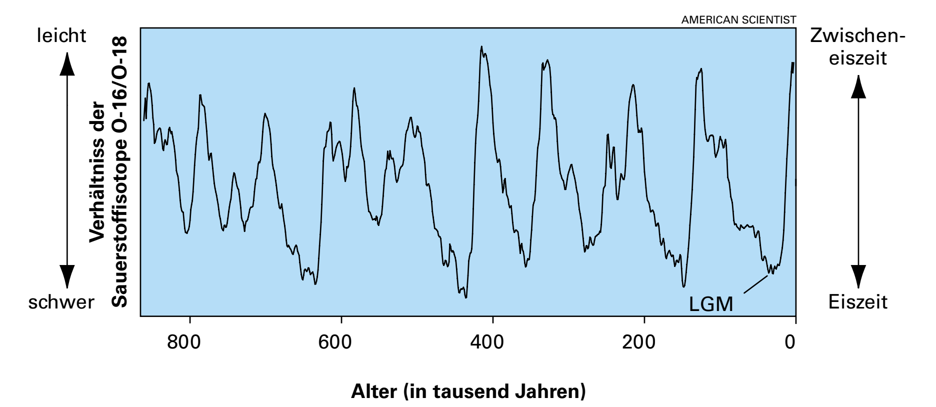
Während einer Eiszeit bleibt deshalb in den Ozeanen vermehrt Wasser mit schwerem Sauerstoff zurück. Falls dann ein Meeresorganismus eine Schale aus Kalziumkarbonat ($CaCO_3$) bildet, wird diese einen überdurchschnittlich hohen Anteil an schwerem Sauerstoff O-18 enthalten. Stirbt dieser Organismus, fällt seine Schale auf den Meeresboden und archiviert von nun an das Isotopenverhältnis im damaligen Ozean.

Geologen haben viele ozeanische Sauerstoffisotope gesammelt, und zwar von Sedimenten der Tiefseeböden. Die Forscher haben auch das Isotopen-Verhältnis im Eis gemessen, das sich in der Antarktis angereichert hat. Die Sauerstoffisotope aus dem Eis und den Meeressedimenten erzählen eine auffällig ähnliche Geschichte: Die Klimaveränderungen der Eiszeiten wiederholen sich in Abständen von ungefähr 100 000, 40 000 und 20 000 Jahren. Warum schwankt das Klima in diesen drei Zeitspannen? Die Antwort liegt in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne:

▶ Die erste dieser Perioden konnten Planetologen der Exzentrizität der Erdumlaufbahn zuordnen, also der Abweichung ihrer Bahn von der perfekten Kreisform. Alle 100 000 Jahre wechselt die Erdumlaufbahn zwischen einer Ellipse und einem Kreis.

▶ Die zweite Periode führen sie auf die Neigung der Erdachse zurück. Innerhalb von ungefähr 40 000 Jahren schwankt diese zwischen 22,5 und 24,5 Grad.

▲ Schauplatz Barentssee: Mit Hilfe eines Schiffssonars wurden lange Zungen glazialen Sediments entdeckt (dunkle Bereiche, links). Diese Ablagerungen erstrecken sich vom Rand des Kontinentalschelfs den Kontinentalhang hinunter und in Richtung Tiefsee (rechts).



▶ Verräterische Muscheln: Die Sauerstoffisotope in ihren Kalkschalen spiegeln die kalten Eiszeiten (niedrige Werte) und wärmeren Zwischeneiszeiten (hohe Werte). Während der Eiszeiten lagert sich vorzugsweise leichter Sauerstoff (O-16) ins Polareis ein; dadurch reichern sich das Meereswasser und die Muschelschalen, die sich darin bilden, verstärkt mit schwerem Sauerstoff (O-18) an – zuletzt vor 20 000 Jahren, dem »Letzten Glazialen Maximum« (LGM).

▶ Die dritte Periode betrifft die Position der Erde auf ihrer Ellipsenbahn in Relation zum Sommer auf der Nordhalbkugel: Diese Relation variiert regelmäßig im Verlauf von 20 000 Jahren.

Die drei Perioden modulieren die Strahlung. Wirken die drei orbitalen Parameter so zusammen, dass sich die Einstrahlung auf der Nordhalbkugel im Sommer deutlich verringert, dehnen sich Gletscher und Eisdecken aus und lösen womöglich eine Eiszeit aus.

Verstärker für den Klimasturz

Die tatsächlichen Schwankungen unseres Erdklimas stimmen mit den theoretischen Vorhersagen exzellent überein. Doch hat die Sache einen kleinen Haken: Die Veränderungen der Sonneneinstrahlung durch die Schwankungen der Umlaufbahn sind für sich betrachtet viel zu gering, um allein schon die beobachteten Eiszeiten auszulösen. Was fehlt, sind zusätzliche Effekte, die kleine Bahneinflüsse in dramatische Klimaveränderungen umwandeln. Verschiedene solcher Verstärkermechanismen sind diskutiert worden. Wahrscheinlich tragen sie alle in irgendeiner Form zum Phänomen der Eiszeiten bei.

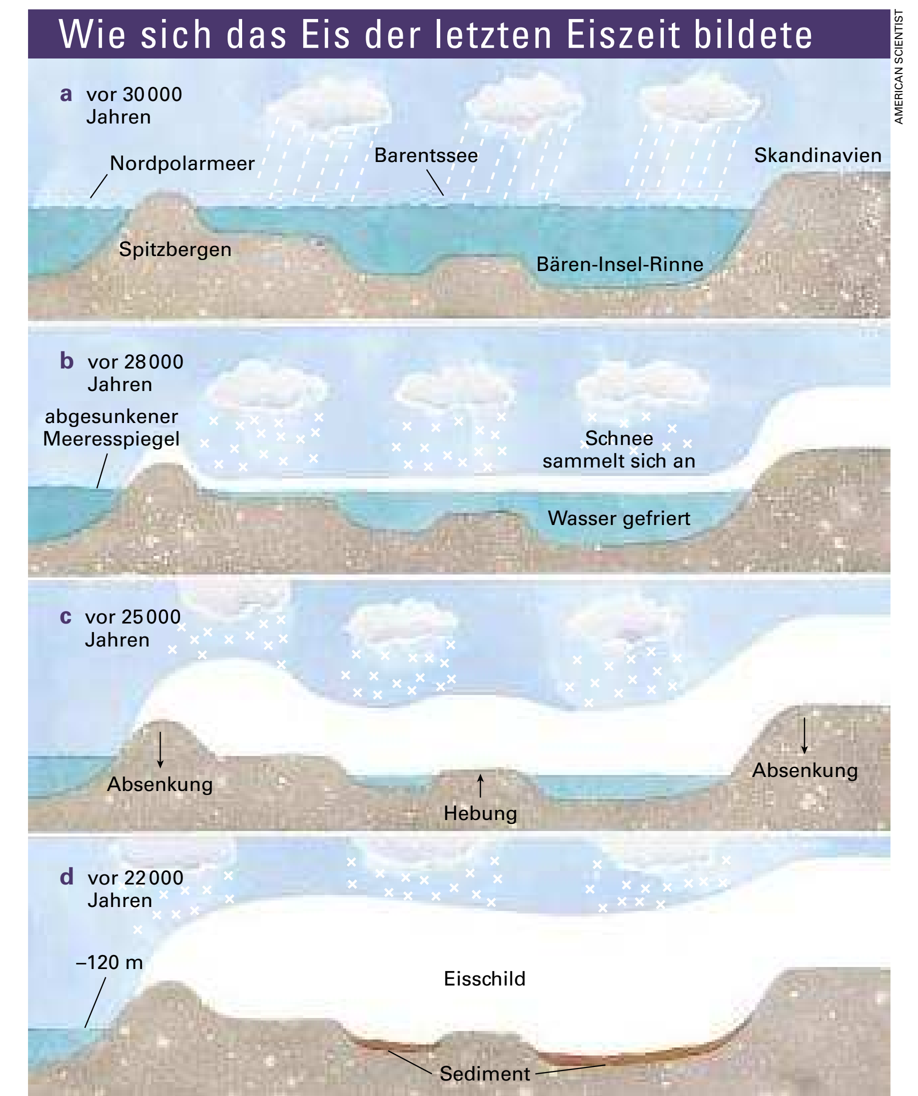
Der vielleicht am einfachsten zu verstehende Mechanismus ist das so genannte Eis-Albedo-Feedback. Die Rückstrahlung der Erdoberfläche, ihre Albedo, steuert die Menge an Sonnenstrahlung, die von der Erde in den Weltraum zurückgeworfen wird. Bei hoher Albedo wird mehr Strahlung reflektiert. Bei einer niedrigen Albedo absorbiert der Planet mehr Strahlung, die Erde erwärmt sich. Bei hoher Albedo reflektieren Schnee und Eis natürlich sehr viel Licht. Dehnen sich Schnee- und Eisfelder dank einer globalen Abkühlung aus, dann wird auch mehr Sonnenstrahlung ins All zurückgeworfen.

Ein anderer Verstärkereffekt hängt vom Kohlendioxid (CO_2) der Luft ab. Das geruchlose und unsichtbare Gas trägt wesentlich zum Treibhauseffekt bei. Aus noch nicht gänzlich bekannten Gründen sinkt während der Eiszeiten die Konzentration an atmosphärischem CO_2. Fällt die Temperatur abermals aus anderen Gründen, dann reduziert das auch den Kohlendioxidgehalt. Das wiederum vermindert den Treibhauseffekt, was eine weitere Abkühlung zur Folge hat.

Die Schwankungen der Erdbahn erklären zusammen mit solchen Verstärkereffekten ziemlich einfach, wie eine Verschlechterung des Klimas das Eis am Festland wachsen lässt. Nicht so klar ist jedoch, wie durch globale Abkühlung Eis auf dem Meeresboden entstehen kann. Seit vielen Jahren wird darüber gestritten, wie ein ausgedehnter Kontinentalschelf mit Eis ausgefüllt werden kann. Problematisch ist vor allem, dass Eisdecken umso mehr Eisberge abstoßen (»kalben«), je tiefer das Wasser ist. Wenn also der Rand einer Eisschicht in tieferes Wasser gerät, brechen immer mehr Eisberge ab, bis die weitere Ausdehnung des Eises gestoppt wird.

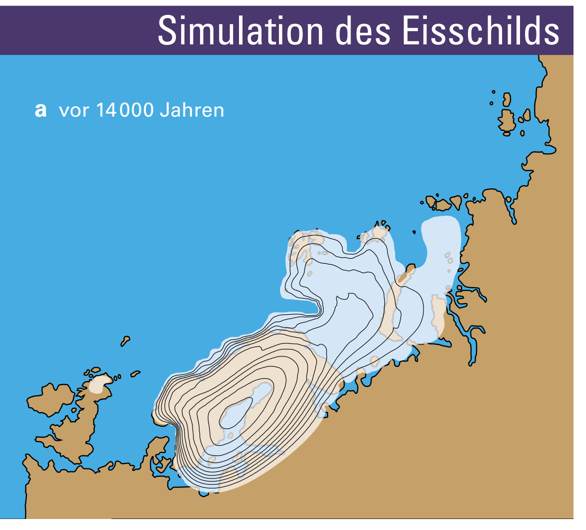
Terence Hughes von der University of Maine schlug folgenden Ablauf vor: Innerhalb der Barentssee könnte sich eine Eisdecke aus einem schon vorhandenen Schelfeis entwickeln – aus einer festen Eismasse also, die auf dem Meer treibt. Seiner Ansicht nach könnte dann ein mehrere Meter mächtiges Meereis zu einem Schelfeis von mehreren hundert Metern Dicke anwachsen, falls über die Jahrtausende oben mehr Eis hinzukommt, als unten abschmilzt. Schelfeis in der Barentssee würde das Eiswachstum in doppelter Weise anregen. Erstens würden von einer angrenzenden Eisdecke weniger Eisberge kalben: Das Eis würde einfach in das Schelfeis fließen. Und zweitens würde das Schelfeis, wenn es mächtiger würde, schließlich den Meeresboden berühren und sich mit der bereits auf Grund liegenden Eisdecke verbinden.

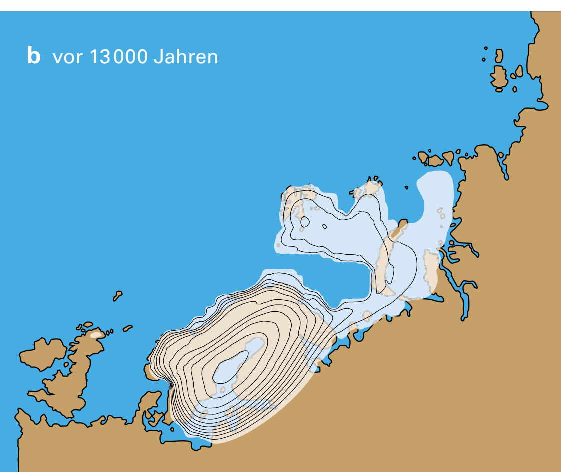
Ein weiterer Mechanismus könnte zur Entstehung einer Eisdecke innerhalb der Barentssee beigetragen haben. Manche Forscher nehmen an, dass sich das Eis der letzten Eiszeit zunächst über den ▷

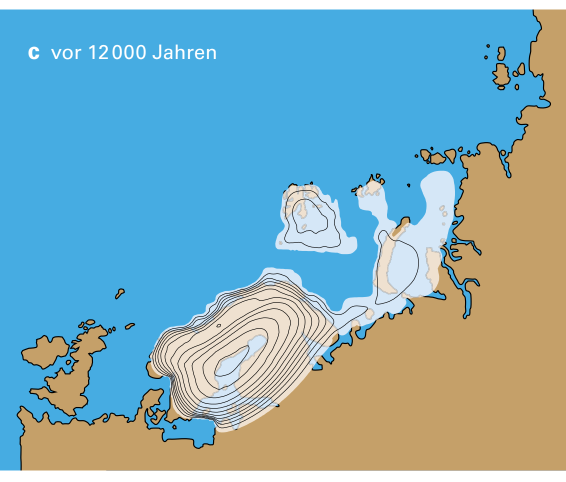


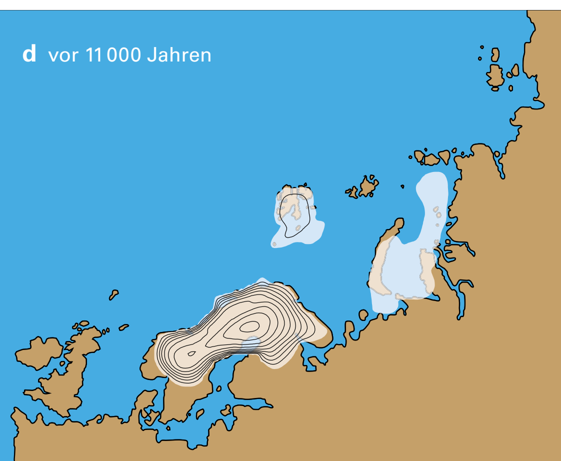
▶ **So stellen sich die Forscher vor, wie sich zu Beginn der letzten Eiszeit die Barentssee allmählich mit Eis bedeckte. Vor 28 000 Jahren schließt sich Treibeis zur festen Eisdecke (b). Schnee und Eis drücken die Inseln im Norden (links) und das Festland (rechts) nach unten. Dadurch steigt der Meeresboden dazwischen (c). Der Meeresspiegel sinkt um 120 Meter und das Eis im Schelfgebiet kommt direkt auf dem Meeresboden zu liegen (d).**

Simulation des Eisschilds









AMERICAN SCIENTIST

◁ **Die letzte Eiszeit im Computer: In dieser Simulation erreicht der Eisschild der Barentssee eine Dicke von 2750 Metern, die bis vor etwa 14000 Jahren unverändert bleibt (a). Danach zerfällt der Eispanzer relativ rasch, sodass vor 13000 Jahren bereits ein großer Teil der Region zwischen Skandinavien und Nowaja Semlja frei von auf Grund liegendem Eis ist (b). Vor 12000 Jahren trennt sich das Eis, das Spitzbergen bedeckt, von dem Schild, der immer noch auf Skandinavien und der russischen Arktis liegt (c). Vor 11000 Jahren wird das Eis in der Region noch dünner und teilt sich in drei voneinander getrennte Massen auf (d). (Helle Farben zeigen, wo die Eisbedeckung mindestens 50 Meter dick wird. Höhenlinien der Eismächtigkeit sind in Intervallen von 250 Metern eingezeichnet.)**

▷ Inselgruppen am Nordrand des eurasischen Kontinentalschelfs ansammelte. Das Gewicht dieser Eismassen drückte den Boden an den Rändern nach unten, wodurch er sich in den flachen, zentralen Teilen der Barentssee nach oben ausbeulte. Diese Hebung könnte in Kombination mit der Absenkung des Meeresspiegels von bis zu 120 Metern dazu geführt haben, dass sich auch seichte Gebiete mit Eis füllten.

Beide Prozesse könnten während der letzten Eiszeit wirksam gewesen sein. Außerdem zeigen Funde aus dem nahe gelegenen Europäischen Nordmeer, dass der Ozean dort während der letzten Eiszeit nicht zugefroren war. Dieses relativ warme Meereswasser lieferte eine Menge Feuchtigkeit, die über der Barentssee als Schnee fiel. Wahrscheinlich ließ erhöhter Schneefall zusammen mit einem dicker werdenden Schelfeis die Barentssee rasch zufrieren. Daher stellen sich Geologen inzwischen weniger die Frage, wie das Eis sich bildete, sondern eher, wie es wieder verschwand.

Verschiedene Indizien verraten uns, wie sich der Eisschild, der einst diesen Teil der eurasischen Arktis bedeckte, aufgelöst haben musste. Die Sauerstoffisotop-Daten von Sedimenten entlang der nahe gelegenen Framstraße und dem Kontinentabhang zeigen, dass sich vor 16000 Jahren das Wasser dort mit leichtem Sauerstoff angereichert hatte. Das belegt: Damals müssen große Mengen an glazialem Schmelzwasser in diese Region eingeströmt sein. So wurde uns klar, dass die Barentssee während der letzten Wiedererwärmung ihren Eispanzer ziemlich früh verlor.

Wie andere Forscher haben auch wir Moränen kartiert, die beim Rückzug des Eises entlang dem Meeresboden der Barentssee zurückblieben. Von Schiffen aus sondierten wir dazu den Meeresgrund. Offenbar brach das Eis zuerst in größeren Meerestiefen auseinander. Ungefähr vor 14000 Jahren verlor die Rinne bei der Bäreninsel (südlich von Spitzbergen) ihr Eis. So entstanden vermutlich eine Reihe offener Meeresbuchten, umgeben von zerfallenden Eiswänden. Vor rund 12000 Jahren waren die Eisschichten nur noch auf die nördlichen Inselgruppen und die Flachwasserbereiche der Umgebung beschränkt.

Schnell kalben die Eisberge

Den zunehmenden Eiszerfall innerhalb der Barentssee belegen auch die Landmassen, die rund um Spitzbergen und das Franz-Josef-Land angehoben wurden. Die Strände auf diesen Inseln wurden anhand von Walknochen, Molluskenschalen und Treibholz datiert. Ihre Chronologie deckte auf, dass die Archipele ihr Eis erst einige tausend Jahre nach dem Eiszerfall in den tieferen Bereichen der Barentssee verloren.

Um die Geschichte dieses ehemaligen Eisschilds zu rekonstruieren, haben wir auch zahlreiche numerische Simulationen durchgeführt. Dafür muss man über einen langen Zeitraum hinweg Meeresspiegel, Lufttemperatur und Schneefall bestimmen. Wenn wir es im Modell schaffen, eine Eisschicht zu erzeugen, die mit den geologischen Bedingungen in Einklang steht, können wir die Ursachen für Wachstum und Zerfall von Eisschilden besser einschätzen.

Sowohl das Ponam- als auch das Queen-Programm benutzten solche Simulationsrechnungen für die Größe und Dynamik des ehemaligen Eisschilds. In dem Modell passten wir die Umweltdaten so lange an, bis die Ausdehnung des Eises mit dem beobachteten Eisrand übereinstimmten. Damit konnten wir schließlich Aussagen über Ausdehnung, Mächtigkeit und Fließgeschwindigkeit des ehemaligen Eisschilds treffen.

Nachdem wir die Eisdecke in voller Größe dargestellt hatten, mussten wir sie im nächsten Schritt in einer Weise abschmelzen lassen, die zu den geologi-

schen Daten der tatsächlichen Enteisung passte. Doch war dies nicht so einfach. Um diese nachzuahmen, mussten wir im Modell die Geschwindigkeit des Kalbens von Eisbergen recht deutlich erhöhen – eine Überraschung.

Warum zerfiel die wirkliche Eisdecke so rasch? Die Antwort fanden wir im Mechanismus, der die Eisberge hervorbringt. Als die Eiszeit in die erste Phase der Erwärmung eintrat, hob sich der Meeresspiegel allmählich. Dieser Anstieg wirkte sich auf das Eis der Barentssee doppelt aus:

- Erstens nahm die Wassertiefe zu, was das Eis auf dem Meeresgrund verstärkt kalben ließ.
- Zweitens sank das Gewicht des Eisschilds. Das reduzierte die Reibung des Eises über den Untergrund und erhöhte so seine Fließgeschwindigkeit.

Das rasche Abschmelzen des Eispanzers hier und anderswo ließ den Meeresspiegel ansteigen, was wiederum das Kalben beschleunigte. So verursachte eine relativ geringfügige Veränderung des Meeresspiegels wahrscheinlich das rasche Aufbrechen des eurasischen Eisschilds.



Eine Warnung für die Westantarktis?

Während der letzten Eiszeit hatte sich auch die Eisdecke in der Westantarktis wesentlich weiter ausgedehnt als heute. Wahrscheinlich lag – genau wie in der Barentssee – überall auf dem Kontinentalschelf Eis am Meeresgrund. Doch der Zerfall dieser vergrößerten westantarktischen Eisdecke unterschied sich von dem Eiszerfall in der Barentssee in zweierlei Hinsicht. Zum einen setzte das Abschmelzen in der Antarktis viel später ein als in der Barentssee. Zum anderen bildeten sich durch den Eiszerfall zwischen dem auf Grund liegenden Eisschild und dem offenen Meer große, frei treibende Schelfeisflächen. Solche gibt es noch heute: Beispielsweise beanspruchen derzeit das Filchner-Ronne- und das Ross-Schelfeis Flächen von jeweils etwa 500 000 Quadratkilometern.

Für die Stabilität des heutigen westantarktischen Eisschilds hat das zwei Konsequenzen:

- Da sie den auf dem Meeresgrund liegenden Rand des Eisschicht abstützen, könnten die Schelfeisgebiete den Eisschild stabilisieren. In der Barentssee fehlten solche Schelfeise, und der auf Grund liegende Eisrand kalbte sehr rege.
- Den Stützeffekt der Schelfeisflächen auf den Eisschild vorausgesetzt, reichen die Meeresspiegelschwankungen derzeit nicht aus, um heute das Eis in der Westantarktis ähnlich rasch abzubauen wie einst in der Barentssee.

Außerdem: Während der letzten Zwischeneiszeit lag der Meeresspiegel einige Meter höher als heute und dennoch zerfiel der Eisschild der Westantarktis nicht. Der größte Teil des Wassers, das damals für den höheren Meeresspiegel sorgte, stammte wahrscheinlich aus Grönland.

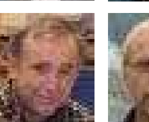
Der Eisschild der Westantarktis vermag offenbar auch einem deutlichen Anstieg des Meeresspiegels standzuhalten – aber warum? Die Antwort könnte durchaus sein, dass die treibenden Schelfeisflächen in der Westantarktis das auf Grund liegende Eis stabilisieren. Falls das zutrifft, sollte man sich also in der Westantarktis heute eher um die Stabilität der Schelfeisgebiete sorgen. Deren Abschmelzen würde zwar den Meeresspiegel allein nicht erhöhen – genau so wenig wie das Schmelzen eines schwimmenden Eiswürfels den Wasserstand in einem Glas hebt. Doch wenn sie abschmelzen, würde der westantarktische Eisschild schon deutlich früher so aussehen wie der ehemalige Eisschild Nordeuropas kurz vor seinem Zerfall.

Was könnte den Zerfall von Schelfeis am Südpol verursachen? Die Antwort liegt im antarktischen Ozean verborgen. Am meisten Material geht dem Schelfeis durch Abschmelzen vom Meeresgrund her verloren. Wenn sich also der Ozean rund um die Antarktis aufwärmt, wird die Schmelzgeschwindigkeit steigen. Wird dies nicht – im Zuge der Erwärmung des südlichen Ozeans – durch erhöhte Verdunstung und Schneefall ausgeglichen, schrumpft das Schelfeis und verschwindet schließlich ganz. Damit könnte das Drama beginnen: Der Eisschild der Westantarktis könnte dann rasch kollabieren. Man sollte diese Möglichkeit nicht außer Acht lassen – und den Meeresspiegelanstieg von sechs Metern, der daraus folgen würde.

Der eingangs erwähnte Glaziologe John Mercer nannte die gegenwärtige Situation eine »drohende Katastrophe«. Nach unseren Erkenntnissen rund um die Geschichte des eurasischen Eisschilds wird die Gefahr nicht akut, solange die vorhandenen Schelfeisflächen nicht verloren gehen. Dennoch ist deutlich geworden: In nicht allzu ferner Vergangenheit hat solch eine Katastrophe in der Arktis stattgefunden. Die Menschheit sollte sich darauf einstellen, dass sie sich in Zukunft wiederholen kann. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Martin J. Siegert (oben links) lehrt am Bristol Glaciology Centre der Universität Bristol. **Julian A. Dowdeswell** (oben rechts) ist Professor für Physikalische Geografie und Mitglied des Scott Polar Resarch Institute an der Universität Cambridge. **John-Inge Svendsen** (unten links) ist Professor für Geologie an der Universität Bergen (Norwegen). **Anders Elverhøi** (unten rechts), Professor für Quartärgeologie, ist Leiter des Fachbereichs Geologie an der Universität Oslo.

New constraints on the limits of the Barents-Kara ice sheet during the Last Glazial Maximum. Von L. Polyak et al. in: Geology, Bd. 28, S. 611, 2000

Maximum extent of the Eurasian ice sheets in the Barents and Kara Sea region during the Weichselian. Von J. I. Svendsen et al. in: Boreas, Bd. 28, S. 234, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Datenschutz mit Quantenschlüsseln

Die Quantenkryptografie nutzt die exotischen Phänomene der Mikrophysik, um Daten völlig abhörsicher zu verschlüsseln. Quantencodes, bis vor kurzem noch graue Theorie, kommen nun schon als Produkte auf den Markt.

Von Gary Stix

Charles Bennett genießt unter seinen Kollegen im Thomas-J.-Watson-Forschungslabor von IBM den Ruf eines brillanten Theoretikers und eines Pioniers der Quanteninformatik. Wie die meisten Theoretiker hat er freilich wenig Erfahrung in praktischer Laborarbeit. Opfer seiner Weltfremdheit wurde unter anderem ein grüner Teekessel, der auf der Herdplatte in Vergessenheit geriet, bis er rot erglühte. Doch 1989 krempelte Bennett zusammen mit John A. Smolin und Gilles Brassard die Ärmel hoch und wagte ein bahnbrechendes Experiment mit einem Chiffriercode, der auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruhte.

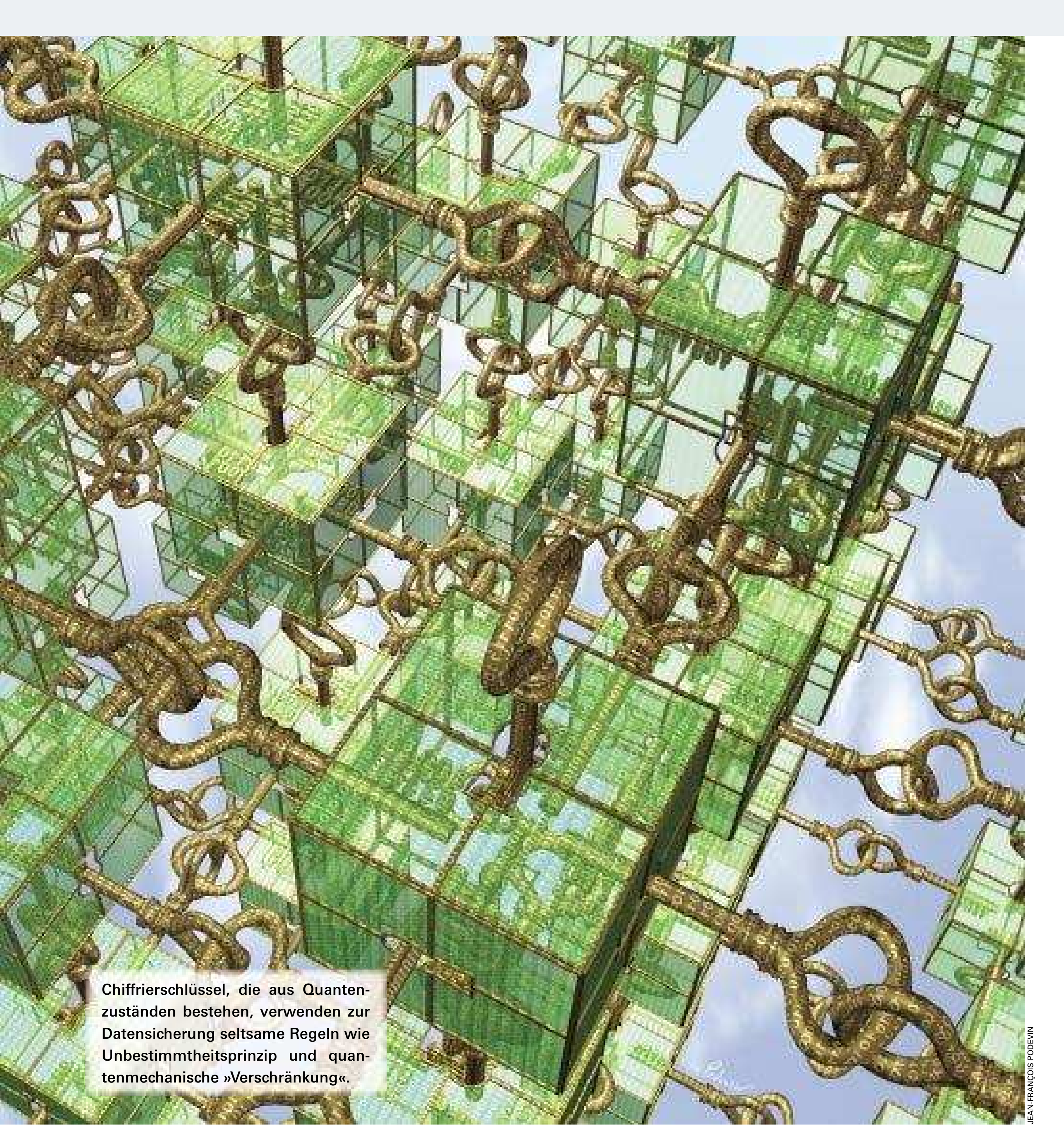
Die Forscher schickten einzelne Photonen – Lichtquanten – durch einen 30 Zentimeter langen Kanal in einer lichtundurchlässigen Kiste, die den Spitznamen »Tante Marthas Sarg« bekam. Die Polarisation der Photonen – ihre Schwingungsrichtung – repräsentierte die Nullen oder Einsen in einer Folge von Quantenbits. Diese Qubits (gesprochen Kjubits) bildeten den kryptografischen Schlüssel, mit dem sich Nachrichten chiffrieren oder decodieren ließen. Vor heimlichen Lauschern schützte diesen Schlüssel die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation. Diese Grundregel der Quantenmechanik besagt, dass bei jedem Messvorgang, der eine Eigenschaft eines Quantenzustands bestimmt, unweigerlich eine andere Eigenschaft desselben Zustands verändert wird. Falls ein Eindringling den Photonenstrom anzapft, verändert er die Bitfolge in einer Weise, die sich sowohl beim Sender als auch beim Empfänger bemerkbar macht. Im Prinzip liefert diese Technik die Grundlagen für eine absolut sichere Datenchiffrierung.

Geheime Botschaften mit »öffentlichem Schlüssel«

Unterdessen hat die Quantenkryptografie das Stadium einer Bastelei in Bennetts Büro weit hinter sich gelassen. Geheimdienstorganisationen wie die amerikanische National Security Agency oder auch die US-Notenbanken können jetzt Quantenchiffriersysteme von zwei kleinen Firmen kaufen – und weitere Produkte sind unterwegs. Die neue Chiffriermethode ist die erste kommerzielle Anwendung der so genannten Quanteninformatik (siehe »Spielregeln für Quantencomputer« von Michael A. Nielsen, Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 19). Letztlich könnte aus der Vereinigung von Quantenmechanik und Informationstheorie ein derart leistungsstarker Quantencomputer hervorgehen, dass gegen seine enorme Fähigkeit zum Codeknacken nur der Einsatz quantenkryptografischer Techniken etwas auszurichten vermag.

Kryptografen müssen gewährleisten, dass Sender und Empfänger einen gemeinsamen Schlüssel nutzen, ohne dass jemand eine Kopie davon stibitzt. Um die geheimen Schlüssel zum Chiffrieren und Decodieren einer vollständigen Nachricht zu verteilen, wird oft eine Methode namens Public-Key-Kryptografie verwendet. Die Sicherheit dieser »Kryptografie mit öffentlichem Schlüssel« beruht auf Faktorisierung oder anderen schwierigen mathematischen Problemen.

Es ist einfach, zwei große Zahlen zu multiplizieren, aber äußerst mühsam, dieses Produkt zu faktorisieren, das heißt in Primfaktoren zu zerlegen. Diesen Umstand nutzt der gebräuchliche RSA-Chiffrieralgorithmus, benannt nach den Initialen von Ronald L. Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman, die ihn 1977 erfanden. Die geheime Botschaft, die der Sender dem Empfänger übermitteln möchte, wird mit einem öffentlich zugänglichen Schlüssel codiert – beispielsweise mittels einer großen Zahl wie 408 508 091. Zum Decodieren der Nachricht ist aber ein Geheimschlüssel nötig, den nur der Empfänger besitzt – in die-



Chiffrierschlüssel, die aus Quantenzuständen bestehen, verwenden zur Datensicherung seltsame Regeln wie Unbestimmtheitsprinzip und quantenmechanische »Verschränkung«.

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

sem Beispiel die zwei Faktoren 18313 und 22307.

In der Praxis werden noch viel größere Zahlen verwendet. Eine Public-Key-Chiffrierung zu knacken ist so schwierig, dass die geheimen Schlüssel in der Regel mindestens zehn Jahre lang halten. Doch die nahende Ära der Quanteninformatik – insbesondere die Fähigkeit von Quantencomputern, gigantische Zahlen blitzschnell zu faktorisieren – könnte für RSA-Verschlüsselung und andere Chiffrierverfahren das Ende bedeuten. »Wenn die Quantencomputer wirklich kommen, ändert sich das ganze Spiel«, sagt John Rarity, Professor für Elektrotechnik und Elektronik an der Universität Bristol (England).

Im Gegensatz zur Public-Key-Chiffrierung wird sich die Quantenkryptografie auch gegen künftige Quantencomputer behaupten. Um einen Quantenschlüssel vom Sender zum Empfänger zu transportieren, übermittelt ein Laser einzelne Photonen, die auf zweierlei Art polarisiert sind. Im einen Fall schwingen die Photonen horizontal oder vertikal (waagrecht-senkrechter Modus), im zweiten Fall sind sie unter 45 Grad rechts oder links zur Vertikalen polarisiert (dia- ▷

Wie die Quantenmechanik einen Geheimcode vor Entdeckung schützt

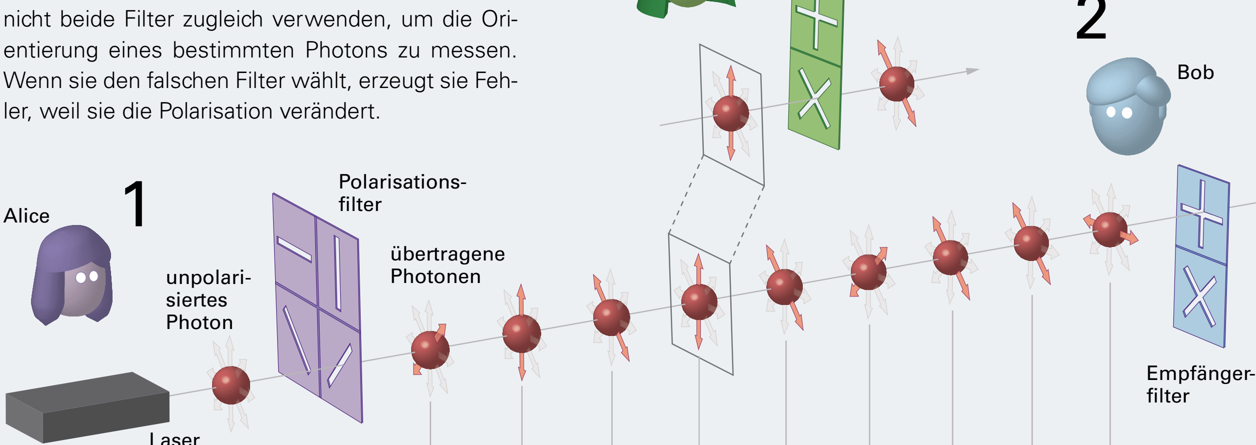
Alice und Bob versuchen zu kommunizieren, ohne von Eva ausspioniert zu werden. Dazu übertragen sie einen quantenkryptografischen Schlüssel in Form von polarisierten Photonen. Dieses Verfahren wurde in den 1980er Jahren von Charles Bennett bei IBM und Gilles Brassard an der Universität Montreal (Kanada) erfunden. Darauf beruhen heute mehrere kommerzielle Produkte.

		Photonen	
waagrecht-senkrechter Polarisationsmodus	+		
diagonaler Polarisationsmodus	×		
zugeordneter Bitwert		0	1

1 Um einen Schlüssel zu erzeugen, sendet Alice einzelne Photonen entweder durch den »0«- oder durch den »1«-Schlitz ihrer waagrecht-senkrechten oder diagonalen Polarisationsfilter. Dabei notiert sie die verschiedenen Orientierungen.

2 Für jedes eintreffende Photon wählt Bob zufällig einen seiner beiden Filter aus. Er notiert sowohl die Filterstellung als auch den Bitwert.

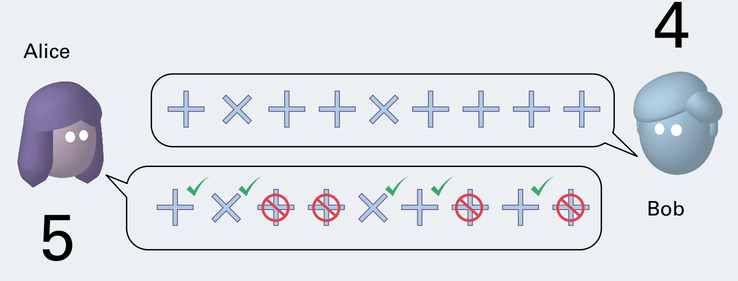
3 Eva versucht die Photonenfolge auszuspionieren. Auf Grund der Quantenmechanik kann sie nicht beide Filter zugleich verwenden, um die Orientierung eines bestimmten Photons zu messen. Wenn sie den falschen Filter wählt, erzeugt sie Fehler, weil sie die Polarisation verändert.



von Alice gesendete Bitfolge	0	0	1	0	1	0	1	1	1
von Alice gewählte Filterfolge	/	|	\	|	\	/	\	\	—
von Bob gewählte Filterfolge	+	+	+	+	×	+	+	×	+
Bitmessungen von Bob	1	0	1	0	1	0	0	1	1
behaltene Bitsequenz (Schlüssel)	–	0	–	0	1	–	–	1	1

4 Wenn Bob alle Photonen erhalten hat, teilt er Alice unverschlüsselt – per Telefon oder E-Mail – mit, in welcher Reihenfolge er die Filter zur Polarisationsmessung eingesetzt hat. Den Bitwert der Photonen behält er aber für sich.

5 Im gleichen Gespräch teilt Alice Bob mit, in welchen Fällen seine Filterstellung korrekt war. Die in diesen Fällen ausgelesenen Bits verwenden Alice und Bob für den Schlüssel, mit dem sie ihre Nachrichten chiffrieren.



TOMMY MOORMAN, NACH: SIMON SINGH, THE CODE BOOK, 1999

▷ gonaler Modus). In jedem Modus repräsentieren die zwei darin möglichen Polarisationsrichtungen die Digitalwerte null oder eins.

Der Sender, den Kryptografen gern »Alice» nennen, schickt eine Bitsequenz, wobei sie die einzelnen Photonen ganz beliebig entweder waagrecht, senkrecht oder diagonal ausrichtet. Der Empfänger – im Kryptografenjargon »Bob« – entscheidet ebenfalls zufällig, in welchem Modus er die eintreffenden Bits misst. Nach dem Heisenberg'schen Unbestimmtheitsprinzip kann er die Bits nur in einem der beiden Modi messen, nicht in beiden zugleich. Nur diejenigen Bits, die Bob im selben Modus misst, in dem Alice sie gesendet hat, haben mit Sicherheit die korrekte Orientierung und behalten somit den richtigen Wert (siehe Kasten auf der Seite gegenüber).

Nach der Übertragung teilt Bob Alice mit, welchen der beiden Modi er beim Empfang jedes einzelnen Photons verwendet hat. Diese Mitteilung muss nicht geheim bleiben; allerdings verrät Bob nicht, welchen Bitwert – null oder eins – jedes Photon repräsentiert hat. Daraufhin teilt Alice Bob mit, welche Modi mit ihren übereinstimmen. Beide ignorieren Photonen, die im falschen Modus gemessen wurden. Die korrekt gemessenen Photonen bilden nun den Schlüssel, mit dem ein Algorithmus Nachrichten codiert oder dechiffriert.

Wenn eine neugierige Person – nennen wir sie Eva – versucht, diesen Photonenstrom abzufangen, kann sie auf Grund des Heisenberg-Prinzips nicht für jedes Photon beide Modi verwenden. Misst sie im falschen Modus, erzeugt sie unweigerlich Fehler – selbst dann, wenn sie die Bits genau so, wie sie diese gemessen hat, zu Bob weiterschickt. Indem Alice und Bob ausgewählte Bits vergleichen und auf Fehler prüfen, können sie entdecken, dass jemand sie belauscht.

Seit 2003 bieten zwei Firmen – id Quantique in Genf und MagiQ Technologies in New York – kommerzielle Geräte an, die einen quantenkryptografischen Schlüssel nicht nur magere 30 Zentimeter weit zu senden vermögen wie einst in Bennetts Laborversuch. Nachdem der japanische Elektronikkonzern NEC einen Übertragungsrekord über 150 Kilometer aufstellte, will er demnächst ebenfalls mit einem Produkt auf den Markt gehen (siehe Tabelle auf dieser Seite). Auch Großfirmen wie IBM, Fujitsu und Toshiba betreiben einschlägige Forschung.

Wer verkauft Quantenschlüssel?

Firma	Technik
id Quantique Genf (Schweiz)	Ein optisches Glasfasersystem sendet quantenkryptografische Schlüssel über Dutzende von Kilometern.
MagiQ Technologies New York (USA)	Ein Glasfasersystem sendet Quantenschlüssel bis zu hundert Kilometer weit. Bietet auch Hardware und Software zur Einbindung in vorhandene Netze.
NEC Tokio (Japan)	Plant die baldige Markteinführung eines Glasfasersystems, nachdem 2004 die Übertragung eines Quantenschlüssels über die Rekordstrecke von 150 Kilometern gelang.
QinetiQ Farnborough (England)	Vermietet Systeme, die Quantenschlüssel bis zu zehn Kilometer weit durch die Luft übertragen können. Lieferte ein System an die Firma BBN Technologies in Cambridge (US-Bundesstaat Massachusetts).

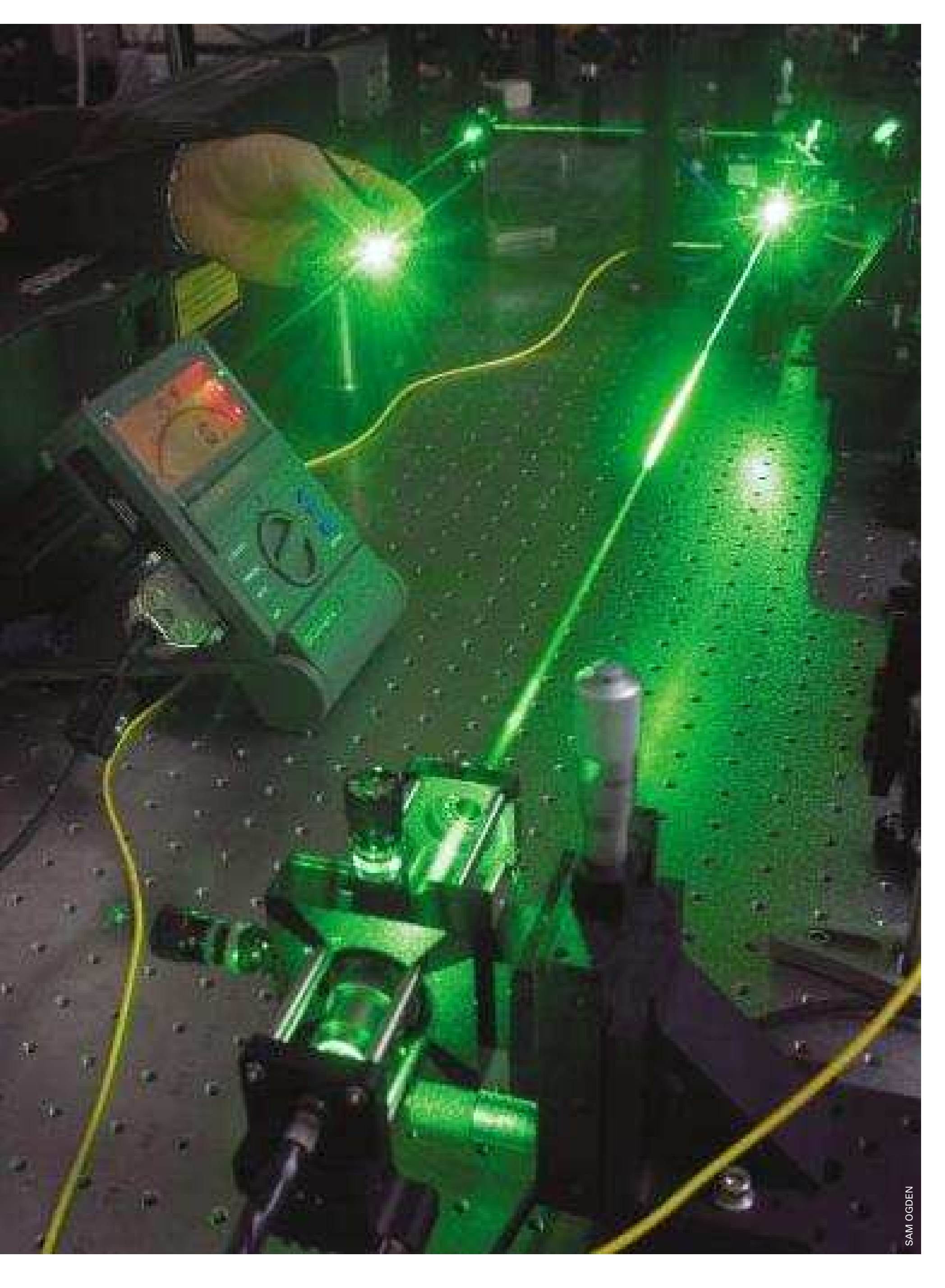
Die bereits erhältlichen Systeme senden den Schlüssel durch spezielle Glasfaserleitungen über mehrere Dutzend Kilometer hinweg. Bei MagiQ kostet ein solches System 70000 bis 100000 Dollar. »Ein paar Kunden benutzen das System probeweise, aber es ist noch nicht umfassend in Netzwerken installiert«, berichtet Robert Gelfond, ein früherer Wallstreet-Analyst, der 1999 MagiQ Technologies gründete. Der Firmenname stammt aus einem Zitat des Science-Fiction-Autors Arthur C. Clarke: »Jede hinreichend fortschrittliche Technologie ist nicht von Magie zu unterscheiden.«

Quantenschutz für Coca-Cola?

Einige Regierungsstellen und Geldinstitute befürchten, eine verschlüsselte Nachricht könnte heute abgefangen und über Jahrzehnte gespeichert werden, bis ein Quantencomputer sie zu dechiffrieren vermag. Richard J. Hughes, Quantenkryptografie-Forscher am Los Alamos National Laboratory, nennt weitere Beispiele für Informationen, die lange geheim bleiben sollen: Volksbefragungsdaten, die Formel für Coca-Cola oder die Steuerungsbefehle für kommerzielle Satelliten. Tatsächlich kaperte ein Hacker namens »Captain Midnight« 1986 vier Minuten lang den Satelliten des TV-Senders HBO und sendete eine Textnachricht. Zu künftigen Abnehmern für Quantenchiffriersysteme gehören Nachrichtentechnikfirmen, die ihren Kunden höchste Datensicherheit bieten wollen.

Schon gibt es erste Versuche, die Quantenkryptografie in bestehende Netzwerke einzubauen. Die amerikanische Militärforschungsagentur Defence Advanced Research Projects Agency finanziert ein Projekt, das über sechs Netzwerkknoten die Universitäten Harvard und Boston sowie BBN Technologies – eine Firma, die entscheidend zum Aufbau des Internets beitrug – miteinander verbindet. Die Schlüssel werden über spezielle Links gesendet, und die damit verschlüsselten Nachrichten wandern ganz normal durch das Internet. »Das ist das erste Quantenkryptografie-Netz, das außerhalb eines Labors kontinuierlich arbeitet«, betont Projektleiter Chip Elliott von BBN. Das Netzwerk soll nur die Machbarkeit der neuen Technik zeigen; es überträgt gewöhnliche, nicht-geheime Internetdaten. »Die einzigen Geheimnisse, die mir dabei einfallen, sind freie Parkplätze«, meint Elliott. Im Herbst 2004 führte die Firma id Quantique zusammen mit dem Genfer Internet-Provider Deckpoint ein Netzwerk vor, das die Daten mehrerer Server an einem zehn Kilometer entfernten Ort als Backup sicherte, wobei häufig wechselnde Schlüssel über eine quantencodierte Verbindung übertragen wurden.

Derzeit lässt sich die Quantenkryptografie nur in geografisch begrenzten ▷


SAM OGDEN

Das Verschlüsseln von Daten mittels Quantenzuständen erfordert raffinierte Technik, die großenteils noch im Versuchsstadium ist. In diesem Labor der New Yorker Firma MagiQ Technologies werden Quantencodes zur Marktreife entwickelt.

▷ Netzwerken einsetzen. Denn der Vorzug der neuen Technik – wer die Nachricht ausspioniert, verändert sie unweigerlich – bedeutet zugleich, dass die Quantensignale unterwegs nicht verstärkt werden können. Ein so genannter Repeater (englisch *repeat* für wiederholen), der ein schwaches Signal auffrischt und zum nächsten Repeater weiterschickt, würde die Qubits verfälschen.

Um die Reichweite zu erhöhen, suchen Forscher nach Alternativen zur Glasfaser. Manche kletterten sogar auf Bergspitzen, um Quantenschlüssel durch die klare Gebirgsluft zu übertragen. Am Los Alamos National Laboratory gelang 2002 eine zehn Kilometer lange Luftverbindung. Im selben Jahr überbrückte die in Farnborough (England) ansässige Firma QinetiQ zusammen mit der Universität München 23 Kilometer zwischen zwei Bergspitzen in den Alpen.

Wenn diese Technik optimiert wird – durch größere Teleskope für den Datenempfang, bessere Filter und nichtspiegelnde Beschichtungen –, könnte ein System entstehen, das Signale mehr als tausend Kilometer weit senden und empfangen kann. Das würde genügen, um Satelliten in niedriger Umlaufbahn zu erreichen; ein entsprechendes Experiment bereitet die Europäische Weltraumbehörde vor. Ein Netzwerk solcher Satelliten würde den gesamten Globus abdecken. Außerdem hat die Europäische Union im April 2004 begonnen, Quantencodes für Nachrichtennetze zu entwickeln – unter anderem, um den elektronischen Datenverkehr vor der Schnüffelei des Echelon-Systems zu schützen. Echelon erfasst praktisch sämtliche E-Mails und Telefongespräche für die Geheimdienste der USA, Großbritanniens und anderer Nationen.

Teleportation – 600 Meter weit

Letztlich wünschen sich die Kryptografen einen Quanten-Repeater – im Wesentlichen einen einfachen Quantencomputer –, um die Beschränkung auf kurze Entfernungen loszuwerden. Das Gerät würde die quantenmechanische Verschränkung nutzen, einen verblüffenden Effekt, den Einstein seinerzeit »spukhafte Fernwirkung« nannte. Ein Team um Anton Zeilinger vom Institut für Experimentalphysik der Universität Wien schuf die Vorstufe eines solchen Repeaters. Wie die Forscher am 19. August 2004 im britischen Wissenschaftsmagazin »Nature« berichteten, führten sie ein Glasfaserkabel durch einen Abwasserkanal unter der Donau hindurch und platzierten an den Enden zwei miteinander »verschränkte« Photonen. Die Messung der Polarisation (horizontal, vertikal und so weiter) an einem von zwei verschränkten Photonen führt dazu, dass das zweite Photon sofort dieselbe Polarisation annimmt.

Zeilingers Team nutzte diese Verschränkung für die »Teleportation« eines dritten Photons, dessen kompletter Quantenzustand dabei 600 Meter weit unter der Donau hindurch ans andere Ufer übertragen wurde. Ein solches System ließe sich im Prinzip erweitern: Über mehrere Zwischenstationen könn-

ten die Qubits eines Schlüssels über Kontinente oder Ozeane hinweg gesendet werden.

Dafür wären freilich erst einmal esoterisch anmutende Komponenten zu entwickeln – insbesondere ein Quantenspeicher, der Qubits unverfälscht zu speichern vermag, bevor sie zur nächsten Station weiterwandern. »Das steckt noch ziemlich in den Kinderschuhen. Es hat die Physiklabors noch nicht verlassen«, meint Nicolas Gisin, der als Professor an der Universität Genf und Mitbegründer von id Quantique ebenfalls mit Verschränkung über große Entfernungen experimentiert.

«Verschränkte« Atomwölkchen

Ein Quantenspeicher würde statt mit Photonen besser mit Atomen funktionieren. Das zeigte ein am 22. Oktober 2004 im Fachblatt »Science« veröffentlichtes Experiment. Alexei Kuzmich und Dmitri Matsukevich vom Georgia Institute of Technology in Atlanta griffen eine Idee von Forschern der Universität Innsbruck auf und erzeugten durch Laserbeschuss zwei verschränkte Wolken aus ultrakalten Rubidium-Atomen, in denen ein Qubit gespeichert war. Dieses Qubit – das heißt der Quantenzustand der Atome – wurde anschließend auf ein emittiertes Photon übertragen. Damit wurde der Informationstransfer von Materie zu Licht demonstriert; auf diese Weise könnte ein Quantenspeicher ein Bit ausgeben. Aus solchen verschränkten Wolken möchten die Forscher Repeater erzeugen, die Qubits über große Distanzen transportieren.

Die erhoffte Unverletzlichkeit der Quantenkryptografie beruht auf einer Reihe von Annahmen, die in der realen Welt nicht unbedingt gelten. Eine dieser Annahmen besagt, dass jedes Qubit nur durch ein einziges Photon repräsentiert wird. In der Quantenkryptografie verwendet man gepulste Laser von so geringer Intensität, dass in der Regel nur jeder zehnte Puls ein Photon enthält; deshalb verläuft die Datenübertragung auch so langsam.

Doch das gilt nur im statistischen Mittel: Der Puls kann auch mehr als ein Photon enthalten. Ein Spion könnte theoretisch solch ein zusätzliches Photon stehlen und damit eine Nachricht decodieren. Ein Software-Algorithmus namens »privacy amplification« (etwa: Geheimhaltungsverstärkung) schützt vor solchen Lauschangriffen, indem er die Werte der Qubits maskiert.

Außerdem hätten die Kryptografen gern bessere Photonenquellen und Detektoren. Das National Institute of Standards and Technologies (Nist) in Boulder (Colorado) ist einer von vielen Orten, wo an solchen Geräten gearbeitet wird. »Ein sehr interessantes Gebiet ist die Entwicklung von Detektoren, die unterscheiden können, ob ein, zwei oder mehrere Photonen gleichzeitig eintreffen«, sagt Nist-Forscher Alan Migdall. Einige seiner Kollegen befassen sich damit, das Problem der langsamen Transfergeschwindigkeit zu bewältigen. Sie erzeugen Quantenschlüssel mit einer Geschwindigkeit von einem Megabit pro Sekunde. Das ist hundertmal schneller als bisher und reicht aus, um Schlüssel für Video-Übertragungen zu übermitteln.

Die Quantenkryptografie wird trotz allem nicht immun gegen besonders raffinierte Attacken sein. Ein Angreifer könnte den Detektor eines Empfängers heimlich so sabotieren, dass die von einem Sender übermittelten Qubits zurück in die Glasfaser sickern und abgefangen werden. Zudem lässt sich die Heimtücke eines Insiders prinzipiell nicht abwehren. »Verrat wirkt immer«, bemerkt Seth Lloyd, Experte für Quantencomputer am Massachusetts Institute of Technology. »Dagegen ist auch die Quantenmechanik machtlos.« Dennoch: Im Zeitalter der Quanteninformation wird es ungeahnt wirksame Methoden geben, Daten zu sichern und Geheimnisse zu wahren. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gary Stix ist Redakteur bei Scientific American.

Geheime Botschaften. Die Kunst der Verschlüsselung von der Antike bis in die Zeiten des Internet. Von Simon Singh. dtv, München 2001

Kryptographie. Spektrum der Wissenschaft Dossier 4/2001

Quantum teleportation across the Danube. Von Rupert Ursin et al. in: Nature, Bd. 430, S. 849, 2004

Quantum-to-classical transition with single-photon-added coherent states of light. Von Alessandro Zavatta et al. in: Science, Bd. 306, S. 660, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Die Methode TheoPrax

Schüler und Studenten sind, mit der geeigneten Betreuung, im Stande, echte Aufträge aus der Industrie zu bearbeiten – und es motiviert sie ungeheuer.

Von Peter Eyerer und Dörthe Krause

Vogeleltern werfen ihre Kinder aus dem Nest, damit sie fliegen lernen. Kalkuliert und betreut natürlich! Wir von TheoPrax machen das ähnlich. Zum Fliegen bringen können wir leider keinen, aber wir werfen Jugendliche gruppenweise ins kalte Wasser des rauen Berufslebens. Wir lassen sie zu Problemstellungen von Firmen und Kommunen Lösungsangebote schreiben und diese dann auch durchführen. Es ist erstaunlich, wie schnell die Kinder schwimmen lernen – manche schneller, manche langsamer. Aber sie lernen es, bis auf ganz wenige, alle.

In den vergangenen neun Jahren haben wir ein bundesweites Netzwerk namens »TheoPrax« aufgebaut (der Name steht für die Verknüpfung von Theorie und Praxis). Ungefähr 70 Firmen, 65 allgemein bildende Schulen, 12 Hochschulen, 5 Gemeinden und 15 Vereine oder Verbände sind eingebunden.

Firmen nennen uns für sie interessante Fragestellungen aus Naturwissenschaft und Technik (zwei Drittel der Themen) oder aus den Bereichen Finanzen, Personal, Vertrieb und Marketing (das restliche Drittel). Wir vermitteln den Firmen interessierte Schüler, Studenten sowie Lehrer und betreuen auf Wunsch die Projektarbeit.

Ein Projekt in trockenen Tüchern

Die Firma Hartmann AG in Herbrechtingen stellt unter anderem Windeln her. Neben Zellulosefasern nehmen bestimmte Kunststoffpulver, die so genannten Super Absorber Powders (SAP), ein Vielfaches ihres Eigenvolumens an Flüssigkeit auf. Da SAP mit etwa 2 Euro je Kilogramm teuer ist, wollte Hartmann das Pulver aus fehlfabrizierten ungebrauchten Windeln zurückgewinnen.

Im Technischen Gymnasium Balthasar-Neumann-Schule in Bruchsal fand sich im Frühjahr 2000 der Seminarkurs der Klasse 12 mitsamt den beiden zuständigen Lehrern bereit, das Projekt als Bestandteil des Lehrplans zu bearbeiten. Martina Parrisius, Biologin und Mitarbeiterin im TheoPrax-Zentrum Pfinztal, wurde Projektbetreuerin.

Nachdem die sechs Schüler in der Firma Hartmann das Problem persönlich erklärt bekommen hatten, trafen sie sich Anfang April zu einem »Kick-off-Meeting« in Pfinztal, auf dem sie ihre Arbeit zu strukturieren begannen, wie sie

Projekte mit Ernstcharakter …

es von Martina Parrisius erlernt hatten. Sie mussten recherchieren, Lösungsmöglichkeiten ersinnen, diese bewerten und viele Pläne erstellen: Arbeits- und Zeitplan, Aufstellung der Kosten für Betreuung, Reisen, Kommunikation und Verbrauchsmaterialien. Am Ende stand ein durchgerechnetes und ausformuliertes Angebot.

Nach einigen Rückfragen gab Hartmann im Mai 2000 den Auftrag in Höhe von 2236 Euro zur Durchführung des Projekts, mit einer Laufzeit von zehn Monaten. Die Freude, der Stolz und damit die Motivation bei Schülern und Lehrern waren riesig.

Meist ist diese erste Planungsphase, in der sich auch das Team zusammenfindet, eine Phase der Frustration. Eigentlich hatte man sich ein Projekt anders vorgestellt, wollte doch loslegen mit dem Arbeiten, statt erst einmal detaillierte Pläne aufzustellen. Persönliche Unverträglichkeiten im Team, fachliche Irrwege und Zeitprobleme kommen hinzu. Wenn es dann endlich richtig losgehen kann, ist die Begeisterung wieder da und wächst meist auch noch weiter an.

Ungefähr zur Halbzeit wird der Stand der Arbeit bei der Firma präsentiert. Hier hat der Auftraggeber Gelegenheit, steuernd einzugreifen. Die zweite Arbeitsphase mündet in aller Regel eine bis zwei Wochen vor der Endpräsentation bei der Firma in die Generalprobe – hektisch, nicht selten chaotisch, vielfach spannungsgeladen.

Verläuft die Abschlussveranstaltung – häufig vor großem Publikum – erfolgreich, steigt die Motivation zu einem Höhepunkt und ist selbst Monate danach noch gegenwärtig. Das ganze Werk hinterlässt dann einen dauerhaften positiven Eindruck – und damit auch Naturwissenschaft und Technik allgemein.

Das Projekt Windelrecycling wurde im Januar 2001 erfolgreich abgeschlossen. Die Schüler gaben der Firma Hartmann im Abschlussbericht Empfehlungen, die diese auch genutzt hat – und die wie bei jeder Projektarbeit der Vertraulichkeit unterliegen.

Feuerprobe

Feuerwehrleute haben allen Anlass, eine Rauchgasdurchzündung (»Flash-over«) zu fürchten: Ein Hausbrand ist durch Sauerstoffmangel erloschen; aber einzelne glühende Stellen (»Glutnester«) bleiben zurück, und Schwaden halb verbrannter, noch brennbarer Rauchgase

hängen in der Luft. Wenn dann die Feuerwehr die Tür öffnet und dadurch Sauerstoff ins Innere gelangt, entzünden sich explosionsartig die Gase, und 1200 Grad heiße Flammen schlagen den Feuerwehrleuten entgegen. Das richtige Verhalten in dieser Situation muss man üben! Diesem Zweck dient die Flash-over-Box, ein großer Metallbehälter für praxisnahe Experimente zu Demonstrations- und Übungszwecken.

Eine solche Flash-over-Box gab die Feuerwehr der kleinen Gemeinde Pfinztal-Berghausen in Auftrag, und zwar an eine Gruppe von sieben Hauptschülern der Klasse 9 aus drei verschiedenen Schulen. Fachbetreuer waren Mitarbeiter aus der Werkstatt des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal unter der Leitung des Werkstattmeisters Thomas Westphal.

Nach dem Kick-off-Meeting im Oktober 2004 trafen sich jeden Freitagnachmittag und Samstag (ganztags) die sieben Schüler (alles Jungen) in der Werkstatt. Schweißen, biegen, abmessen, sägen, bohren, schrauben, verbinden, einpassen …: Alle für ihren Auftrag nötigen Arbeiten konnten sie ausprobieren, üben und dann direkt für den Bau der Flash-over-Box anwenden.

Aber damit nicht genug. Die Schüler mussten wie in jedem Projekt einige Bausteine des Projektmanagements erarbeiten: Wie schreibe ich ein Angebot, in dem auch die Kosten des Projekts enthalten sind? Wie präsentiere ich mein Ergebnis am Ende vor vielen Menschen?

Nach sechs Wochen harter Arbeit war die Box fertig. Beim Probelauf auf dem Werksgelände des ICT am 3. Dezember 2004 zeigte Andreas Hofhansl von der Berufsfeuerwehr in der Karlsruher Westwache, wie die Box fachmännisch zu zünden und zu betreiben ist. Der Auftraggeber und die lokale Presse waren dabei – und die Macher des Projekts sehr schweigsam. Natürlich stellten sich alle die bange Frage, ob sie ordentlich genug geschweißt hatten oder ob die Kiste unter dem Druck der Explosion auseinander fliegen würde.

Umso größer war der Jubel, als sie sahen, dass die Box hielt und großartig funktionierte (Bild unten). Mehr noch: Der Fachmann Hofhansl bescheinigte den Schülern eine außerordentlich gute und saubere Arbeit. Die Lokalzeitung brachte einen ausführlichen Artikel.

Dieses Pilotprojekt hat in mehrfacher Weise Früchte getragen. Die Berghausener Feuerwehr kam an ein Übungs- und Ausbildungsgerät für ihre freiwillige Jugendfeuerwehr, das sie sonst kaum hätte leisten können. Und das Projekt verschaffte den Jugendlichen selbst die Freude am Erfolg sowie den Respekt der Erwachsenen für ihre außergewöhnliche Leistung. Projekte solcher Art sind die Basis für Freude am Lernen.

Einige der Schüler haben sich übrigens nach dem Projekt nach Lehrstellen im ICT erkundigt.

Bisher haben wir 288 Projekte erfolgreich abgeschlossen, davon jeweils etwa die Hälfte mit Schulen und Hochschulen und jedes ein Unikat. Wie hoch die Motivation bei den bisher etwa 800 Schülern, 600 Studenten und 200 Lehrern ist – wir schulen an Wochenenden auch Lehrer im Projektmanagement –, belegen die Abbruchzahlen: Nur ein Schulprojekt mit sechs Schülern und zwei Hochschulprojekte mit insgesamt zehn Studenten wurden vorzeitig abgebrochen. Eine Firma zog während der Bearbeitung den Auftrag zurück.

Ein Erfolgsmodell

Die Schwierigkeiten, mit denen wir zu kämpfen haben, sind typisch für Projekte allgemein: Die Kommunikation lässt zu wünschen übrig, die Beteiligten kommen mit dem Zeitplan nicht zu Rande, das Geld reicht nicht, irgendwelche formalen Bedingungen sind zu erfüllen, und in den Köpfen mancher Professoren, Lehrer, Studenten und Schüler leben die heiligen Prinzipien »Das haben wir schon immer so gemacht« und »Das haben wir noch nie so gemacht«.

… erzeugen ihre Motivation fast von selbst

Zahlreiche Firmen waren durch den Erfolg des ersten Auftrags so überzeugt, dass sie weitere folgen ließen. Das gilt für Großkonzerne ebenso wie für kleinere Unternehmen. In der Liste unserer Mehrfachauftraggeber stehen obenan mit je 19 Aufträgen der Pharmakonzern Pfizer in Karlsruhe, der Maschinenbauer Trumpf ▷





Erster Härtetest für die von sieben Hauptschülern gebaute Flash-over-Box der Feuerwehr Pfinztal-Berghausen

BEIDE FOTOS: FRAUNHOFER ICT





THEOPRAX-ZENTRUM

Schüler des Melanchthon-Gymnasiums in Bretten präsentieren ihren selbst gebauten Mini-Extruder, ein Gerät, das nach dem Prinzip des Fleischwolfs dünne Stränge aus einer Masse zähen Materials produziert.

in Ditzingen und der mittelständische Kunststoffzubehörhersteller Murrplastik im schwäbischen Oppenweiler. Auch die Firma Hartmann hat neben dem Recycling der fehlfabrizierten Windeln noch neun Projekte in Auftrag gegeben.

Weitere Ziele unserer Projektarbeit, neben dem Hauptziel Steigerung der Motivation beim Lernen und zum Lernen, sind die Stärkung von überfachlichen Fähigkeiten *(soft skills)*, mehr Interesse für Technik sowie Verzahnung von Schule/Hochschule und Wirtschaft. Last not least sollen die Schüler und Studenten das Übernehmen von Verantwortung einüben, was durch den Ernstcharakter – die Firma will für ihr Geld nützliche Leistung – fast von selbst gelingt. Darüber hinaus hat ein Teilnehmer an einem solchen Projekt hinterher meistens klarere Vorstellungen von seinem Berufsziel und ist eher geneigt, Probleme aktiv zu lösen.

Allgemein wird beklagt, dass die Ausbildung an deutschen Schulen und Hochschulen praxis- und berufsfern, zu abstrakt und theoretisch und nicht auf das Arbeiten im Team hin orientiert ist. Dem setzt TheoPrax ein detailliert ausgearbeites Ausbildungskonzept entgegen (Grafik unten). Darin beschränkt sich die bislang dominierende frontale Wissensvermittlung auf nur noch etwa 25 Prozent der Zeit. Die »Lehre im Dialog«, ein Rollenspiel mit Ernstcharakter, regt die Zuhörer zum Fragen an, die projektorientierten Gruppenübungen (ebenfalls etwa 25 Prozent) mit 30-minütiger, frontaler Hinführung zum Thema sind ein didaktischer Zwischenschritt hin zur Projektarbeit. Diese nimmt mit etwa 40 Prozent den Hauptteil ein. Der Rest sind Diskussionen und Exkursionen.

Mit begleitenden Lehrmodulen zum Projektmanagement, zwei- bis dreitägigen Lehrerfortbildungen sowie mit der Initiierung und Begleitung von Schülerfirmen (bisher 23) rundet TheoPrax sein didaktisches Konzept ab.

Die Jagd nach dem Geld

Allein von den Aufträgen der Industrie kann TheoPrax sich – noch – nicht tragen. Vor allem der Ausbau des Konzepts für neue Branchen und neue Ausbildungsgänge erfordert Vorleistungen. Zu deren Finanzierung stellte das Zentrumsteam 37 Anträge bei Landes- und Bundesministerien, bei der EU, bei Stiftungen und vereinzelt bei Kommunen, Verbänden und Firmen. Davon wurden 18 Anträge genehmigt, sodass wir seit 1996 etwa 2,7 Millionen Euro – vorwiegend für Personalmittel – akquiriert haben. Ein großer Teil davon stammt aus Anschubfinanzierungen der beiden für Schule beziehungsweise Hochschule zuständigen Landesministerien in Baden-Württemberg.

Das Einwerben dieser Mittel ist ein mühsames, kräftezehrendes und zuneh-

Das Ausbildungskonzept von TheoPrax: Kombinierte Lehr- und Lernkultur erzeugt Unternehmer.

Frontalunterricht, Vorlesung
- inaktives Zuhören
- kompakte, strukturierte Wissensvermittlung
- sozial isoliert
- pauken

Lehre im Dialog
- diskutieren
- Wissen hinterfragen und bewerten
- Gesprächskultur üben

projektorientierte Gruppenübungen
- aktiv Fragen stellen
- Wissen verarbeiten
- Gruppenprozess üben
- Ideenstimulation

Projektarbeit im Team
- fachübergreifendes Umsetzen
- Wissen anwenden
- zusammenarbeiten
- Realität erleben und begreifen
- Verantwortung übernehmen

Unternehmer
- Freude am Erfolg
- Mut zum Risiko
- Selbstständigkeit
- Denken im System
- soziales Engagement
- Wissen und Fähigkeiten umsetzen zu Produkten


ANZEIGE



Das Projekt TheoPrax

Es begann damit, dass das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal bei Karlsruhe 1996 sechs Patenschaften für Schulen in der Nähe übernahm. Heute ist TheoPrax mit zehn bundesweiten Zweigstellen eine der wirkungsvollen Bildungsinitiativen, um Jugendliche für Naturwissenschaften und Technik zu begeistern. Das TheoPrax Zentrum, das im ICT angesiedelt ist, beschäftigt 5 bis 8 Mitarbeiter, jedes Kommunikationszentrum mindestens einen.

Seit 2001 hat TheoPrax die Rechtsform einer gemeinnützigen rechtsfähigen Stiftung bürgerlichen Rechts mit dem Ziel der Förderung und Unterstützung von Bildung und Ausbildung.

Ein Schulprojekt verursacht im Mittel etwa 1600 Euro Kosten, mit einer Spanne von 300 bis 5000 Euro. Hochschulprojekte kosten durchschnittlich etwa 2800 Euro bei 1200 bis 42 000 Euro als Bandbreite. Der Hauptteil der Kosten entfällt auf die Projektbetreuung. Der Stundensatz für Mitarbeiter der beiden Institute (Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart und ICT) beträgt 90 Euro. Das TheoPrax Zentrum berechnet 15 Prozent auf die Personalkosten für den Organisationsaufwand.

Projekte und Unterstützung aller Art sind stets willkommen! Bieten Sie uns Projektthemen an, vermitteln Sie uns interessierte Schulen und Lehrer, gründen Sie ein TheoPrax-Kommunikationszentrum in Ihrer Nähe oder unterstützen Sie diese Initiative zum Wohle der Jugend durch Spenden oder ehrenamtliches Engagement.

Bieten Sie uns ein Projektthema zweckmäßig (aber nicht ausschließlich) im Frühsommer an, oder schon im Mai, wenn es für die Seminarkurse und »Besonderen Lernleistungen« in der Schule, die frühzeitige Planungen erfordern, in Frage kommt. Dann können wir das Projekt in Absprache mit Ihnen aufbereiten und den Partnerschulen und -hochschulen so rechtzeitig anbieten, dass die eigentliche Arbeit mit Beginn des Schuljahres oder des Wintersemesters aufgenommen werden kann.

TheoPrax Zentrum
Fraunhofer Institut für
Chemische Technologie (ICT)
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal-Berghausen
Telefon 0721 4640-305
http://www.theo-prax.de

▷ mend ineffektives Geschäft. Die Bereitschaft zum Sponsoring ist in Deutschland ohnehin nicht sonderlich ausgeprägt und lässt bei schlechter Wirtschaftslage zusätzlich nach. Der Pisa-Schock hat auch staatliche Stellen nicht bewegt, mehr Projekte auszuschreiben, bei denen wir uns um Fördermittel bewerben könnten – im Gegenteil. Wenn das Geld fließt, dann häufig nur für kurze Zeit (»Anschubfinanzierung«) oder mit der Bedingung, dass es nicht für Personalkosten verwendet werden darf.

Einen Antrag zu stellen kostet viel Arbeit, die bei einer Ablehnungsquote von 50 Prozent doppelt schmerzt, und die Bürokratie zur vorschriftsmäßigen Abarbeitung genehmigter Anträge wird immer hinderlicher, frustrierender und widersprüchlicher. In beiden Fällen ist der Aufwand überwiegend ehrenamtlich zu leisten.

Die Umsetzung von neuen Ideen in Deutschland ist allgemein schwierig. Das gilt für Schulen und Hochschulen in verschärftem Maße. Zu glauben, dass man dort innerhalb von zehn Jahren große Dinge bewegen könne, grenzt an Ignoranz. Dennoch hat sich einiges bewegt; nicht wegen TheoPrax, aber immerhin mit TheoPrax, vielleicht punktuell auch durch TheoPrax.

Für die Zukunft haben wir noch viel mehr vor. Wir glauben, dass die TheoPrax-Methode zur Integration in Bildungspläne aller Art geeignet ist. Dieses wahrlich anspruchsvolle Ziel ist durch Tausende kleiner Schrittchen zu erreichen. In der Konsequenz muss TheoPrax von der Person seiner Initiatoren unabhängig werden.

Im Einzelnen wollen wir

- fachliche Lehrmodule zur Projektarbeit in laufender Forschung erstellen, mit dem Ziel, schon Schüler an Forschung beteiligen zu können;
- unsere Methode in Integrationsprojekte mit ausländischen Schülern einsetzen;
- die Hochbegabtenförderung (zum Beispiel in der Science Academy Baden-Württemberg, einer zweiwöchigen Veranstaltung in Naturwissenschaften für hochbegabte Schüler) weitere zwei Jahre unterstützen;
- Projektarbeit mit Arbeitslosen zur Integration in den Arbeitsmarkt initiieren;
- unsere Jugendwerkstatt für Projektarbeiten von Jugendlichen in ihrer Freizeit weiter ausbauen (das erste erfolgreiche Projekt ist der oben beschriebene Bau der Flash-over-Box).

Bisher sind wir fast ausschließlich in Deutschland aktiv. Die Ausweitung auf europäische Partner ist nicht nur wünschenswert, weil sie den Horizont der beteiligten Jugendlichen erweitern hilft; sie ist auch zwingende Voraussetzung für Fördermittel aus der EU. Eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Stellen in Friaul (Norditalien) ist geplant: der Kunststoff-Design-Firma Munini, einer Außenstelle der Universitäten Udine und Triest in Pordenone sowie dort ansässigen Schulen. Weitere Kooperationen folgen mit Frankreich in der elsässisch-pfälzisch-oberrheinischen Grenzregion.

Schließlich wollen wir unser Stiftungskapital verzehnfachen, damit etwa 40 Prozent der heutigen Personalkosten gesichert verfügbar sind. Das ist fast ein utopischer Schritt! Aber »wer nicht an Wunder glaubt, ist kein Realist« (wie David Ben Gurion in anderem Zusammenhang gesagt hat). ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Peter Eyerer ist Professor am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal bei Karlsruhe und im Vorstand der TheoPrax Stiftung. **Dörthe Krause** ist Leiterin des TheoPrax Zentrums am ICT und Vorstandsmitglied der TheoPrax Stiftung.

Projektarbeit mit Ernstcharakter – ein Handbuch für die Praxis in Aus- und Weiterbildung für Schule und Hochschule. Von Dörthe Krause und Peter Eyerer (Hg.). Fraunhofer ICT, Pfinztal 2004

Projektarbeit im schulischen Alltag. Von Dörthe Krause in: TheoPrax Magazin, Bd. 1/2003, S. 7, zu beziehen über www.theo-prax.de

TheoPrax an Hochschulen. Von Peter Eyerer in: TheoPrax Magazin, Bd. 1/2002, S. 7

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wenn Bäume Embolien bekommen

Warum Bäume jenseits der Waldgrenze in den Bergen nicht mehr gedeihen, ist noch immer ein Rätsel. Nun entdeckte Winterembolien könnten eine Ursache sein.

Von Stefan Mayr und Dominik Zeillinger

Der Winter in den Hochlagen der Berge ist hart – der beginnende Frühling aber erst recht, zumindest für die Bäume oben an der Waldgrenze. Der Urlaubertraum aus Eis und Schnee unter strahlend blauem Himmel ist für die pflanzlichen Statisten eher ein Albtraum. Unsere Forschungsgruppe bewegt sich seit einigen Jahren in der winterlichen Bergwelt, um den Wasserhaushalt von Bäumen in der Grenzzone ihrer alpinen Verbreitung zu untersuchen. Bei dieser strapaziösen Arbeit stellten wir fest, dass während der kalten Jahreszeit in den Leitungsbahnen von Stamm und Ästen massive Embolien in Form von Lufteinschlüssen auftreten können. Und die müssen im Frühjahr, wenn der Saft wieder aufsteigen soll, beseitigt oder umgangen werden, sonst stirbt der betroffene Ast oder gar der ganze Baum ab.

Ähnlich ausgedehnte Embolien in den Blutgefäßen eines Menschen wären wohl tödlich. Wie aber werden Baumarten damit fertig, die noch an der natürlichen Waldgrenze wachsen? Um Fachleute nicht zu irritieren: Damit meinen wir hier die gesamte diffuse Übergangszone zwischen geschlossenen Waldbeständen und dem völlig baumlosen Bereich.



DOMINIK ZEILLINGER

Schon in tieferen Lagen sind manch andere Arten emboliegefährdet. In den letzten Jahrzehnten haben Botaniker viele verschiedene Gewächse auf derartige Probleme untersucht und dabei Einblicke in die unerwartet spektakuläre Physik des pflanzlichen Wassertransportsystems gewonnen. Sie erklärt zwar, warum Bäume nicht in den Himmel wachsen. Warum ihnen aber in den Bergen obere Verbreitungsgrenzen gesetzt sind, obwohl andere Pflanzen, sogar Sträucher, noch darüber hinaus gedeihen, ist bislang unklar. Könnten die Winterembolien, die unsere Gruppe in den Hochlagen entdeckte, zumindest mit schuld sein?

Gasexplosionen in Leitbahnen

Die Antwort hat viel mit Wasser zu tun. Es ist das A und O allen Lebens auf der Erde. Seit Pflanzen vor etwa 400 Jahrmillionen das Land erobert haben, helfen ihnen immer speziellere Anpassungen, auf dem Trockenen zu überleben. Schutzschichten wie die wachsartige »Cuticula« und Korkeinlagerungen verhindern das Austrocknen oberirdischer Pflanzenteile. Zur Aufnahme von Kohlendioxid für die Photosynthese muss es aber Durchlässe in Blättern und Nadeln geben. Diese Spaltöffnungen sind verschließbar, damit nicht unnötig viel Wasser entweicht. Vorübergehende Wasserverluste puffert das Zellsaftreservoir in den lebenden Zellen ab, effiziente Wurzelsysteme sorgen für ausreichenden Nachschub aus dem Boden.

Als Verbindung zwischen den Wurzeln als Ort der Aufnahme und den Blättern als Ort der Abgabe musste außerdem ein Transportsystem für das Nass entwickelt werden: Tracheiden – kleine, übereinander gestaffelte Hohlelemente mit spitzen Enden – und die viel längeren und weiteren Tracheen. Diese Leitelemente bilden ein System, das durch so genannte Hoftüpfel komplex vernetzt ist (siehe Foto im Kasten S. 82). Perfektioniert wurde es bei Bäumen, die dadurch enorme Wassermengen bis in die Wipfelspitze transportieren können. Und die kann weit über den rund 10 Metern Höhe liegen, bis wohin eine technische Saugpumpe Wasser zu befördern vermag: etwa 115 Meter sind es bei dem höchsten derzeit lebenden Beispiel, einem Mammutbaum in Kalifornien.

Der Wasserferntransport beruht letztlich auf Verdunstung: Was über die Spaltöffnungen in Gasform austritt, wird durch nachrückende Moleküle aus der Flüssigphase von unten ersetzt. Insgesamt entsteht eine Zugspannung auf das Wasser. Man darf sich das zwar in etwa so vorstellen, als würde jemand an den Blättern oder Nadeln saugen und damit Unterdruck erzeugen. In Wirklichkeit ist die Sache aber komplizierter. Durch den speziellen Bau der Leitelemente ist das Wasser darin nämlich metastabil: Es bleibt bei Werten im System noch flüssig, wo es schon gasförmig werden sollte. Bei Fichten fanden wir dies bis zu minus 25 Bar. Die durchgehenden Wasserfäden in den Leitungsbahnen reißen unter der auftretenden Zugspannung so lange nicht ab, wie die Kohäsion zwischen den Molekülen und ihre Adhäsion an der Wandung dies verhindern.

Eine ständige Gefahr für dieses System sind Embolien. Sie drohen zum Beispiel bei Trockenstress, also einem Ungleichgewicht zwischen Transpiration und Nachschub. Dann wird die Zugspannung in den Leitbahnen so groß, dass sich Blasen aus ausgasender Luft

und Wasserdampf bilden und von einem Element zum anderen ausdehnen können (siehe im Kasten oben S. 82). Dieser vor zwanzig Jahren erstmals beschriebene Prozess lässt sich inzwischen durch spezielle Ultraschallsensoren sogar hörbar machen: Wann immer die Wassersäule in einem Leitelement durch die explosionsartige Ausbreitung einer Gasblase abreißt, entsteht ein Klicklaut.

Auch bei Gefrier-Tau-Vorgängen drohen Embolien, da Luft in Wasser, nicht jedoch in Eis löslich ist. Beim Gefrieren gast Luft aus und bildet Blasen, die beim Auftauen expandieren und zur Embolie führen können (siehe im Kasten unten S. 82). Anhaltender Frost an der Waldgrenze bedeutet zugleich Trockenheit: Das Wasser in Boden und Stammbasis gefriert, wenn die Temperatur dort unter minus ein Grad Celsius sinkt. Fachleute sprechen von Frosttrocknis. Auftretende Schäden werden von Laien oft fälschlich als Erfrieren gedeutet.

Rückschlagventile in Nadelbäumen

Nun gedeihen Bäume und andere Pflanzen aber durchaus auch an Standorten, wo sie derlei Stress ausgesetzt sind. Wie begegnen diese Arten den Problemen? Zunächst gilt: Vorbeugen ist besser als heilen. Wer als Pflanze Embolien bei Trockenheit verhindern will, sollte seine Wasseraufnahme und seinen Verdunstungsschutz optimieren. Ein ausgedehntes tiefes Wurzelsystem und eine dicke Cuticula beispielsweise sind nützlich.

Weitere Anpassungen zielen darauf ab, drohenden Schaden zu begrenzen. Schwachstellen für »Trocken-Embolien« stellen die offenen Verbindungen zwischen den Wasser leitenden Bahnen und Elementen dar. Gefährdete Laubbäume besitzen daher Trennhäutchen mit relativ kleinen Poren in ihren Hoftüpfeln: An feinen Öffnungen setzt die Oberflächenspannung des Wassers einem Eindringen von Luft aus einem embolierten Nachbargefäß mehr Widerstand entgegen. Nadelbäume hingegen setzen standardmäßig auf stabile Rückschlagventile in ihren Tüpfeln. Gleichzeitig verringern aber solche Maßnahmen die Effizienz des Transportsystems, weil Wasser, wenn es denn durchtreten soll, schlechter passiert.

Ein ähnliches Dilemma besteht bei den Leitungsbahnen selbst. Nadelbäume setzen auf viele enge Leitelemente: Dank der zahlreichen Parallelwege beeinträchtigt ein Ausfall einiger Elemente den ▷

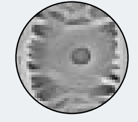


ALLE FOTOS UND GRAFIKEN DES ARTIKELS: STEFAN MAYR

Die winterlichen Bedingungen an der alpinen Waldgrenze sind für Bäume – und Wissenschaftler – unwirtlich. Das Hauptproblem ist Trockenheit gepaart mit Wechselbädern aus Gefrieren und Tauen.

Wie Embolien entstehen

Ursache Trockenheit: Zwei aneinander grenzende Leitelemente sind im Bereich ihrer Zellwände durch so genannte Tüpfel verbunden. Wie hier im schematischen Längsschnitt zu sehen, gelangt bei Laubhölzern das Wasser durch Poren in der Tüpfelmembran in das nächste Gefäß (a, obere Grafik). Ist dieses infolge einer Embolie mit Luft gefüllt, schützt die Oberflächenspannung an der Luft-Wasser-Grenzschicht der Membranporen zunächst vor einem Übergreifen in das Gefäß mit dem Nass (b). Erst bei Erreichen einer kritischen Zugspannung in der Wassersäule, etwa wegen zu hoher Transpiration der Blätter im Vergleich zum Nachschub, breitet sich Luft explosionsartig durch die größten Poren in das benachbarte Leitelement aus (c). Tüpfel von Nadelbäumen verfügen dagegen über eine Art Rückschlagventil. Dabei fließt das Wasser durch ein weitmaschiges Netz, an dem eine zentrale Verdickung, der Torus, aufgehängt ist (d sowie Rasteraufnahme). Durch die Zugkräfte, die im wassergefüllten Leitelement herrschen, dichtet er die Öffnung ab, sobald an einer Seite Luft eindringen will (e). Bei zu hoher Zugspannung wird der Torus aber aus seiner Schließposition verschoben, Luft dringt in das benachbarte Gefäß ein (f).



Wie ein Rückschlagventil kann der zentrale Torus (dunkler Fleck in der Mitte dieser Rasteraufnahme) die Tüpfelöffnung bei der Fichte verschließen.

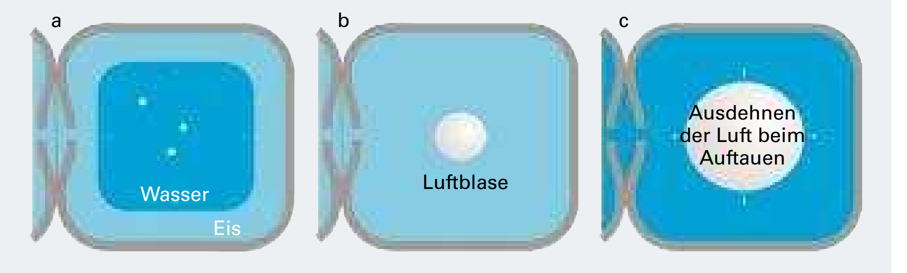
Laubbaum

a Zellwände Wasser Tüpfelmembran | b Luft | c

Nadelbaum

d Tüpfeltorus | e | f

Ursache Gefrier-Tau-Zyklen: Frost bedeutet Wassermangel und Emboliegefahr, wie die schematischen Querschnitte durch ein Leitelement mit Tüpfel illustrieren (unten). Frieren wassergefüllte Leitelemente aus, so verdrängt das Eis zunächst Luft in die noch flüssigen Bereiche (a). Am Ende sitzt in der Regel im Zentrum eine Luftblase (b). Sie kann sich beim Auftauen entweder im umgebenden Wasser wieder auflösen oder – wenn etwa die Zugkräfte im Leitelement zu groß sind – expandieren und zu einer Embolie führen (c).



▷ Wassertransport insgesamt nur wenig. Enge Bahnen beugen zudem Embolien vor, die durch Gefrier-Tau-Vorgänge induziert werden. Da die geringere Wassermenge nicht so viel gelöste Luft enthält, bilden sich beim Gefrieren kleinere, leichter wieder auflösbare Blasen. Beispiele hierfür bieten Fichte und Zirbe an der Waldgrenze der Zentralalpen, unserem Forschungsfeld.

Die Sicherheit geht allerdings wieder zu Lasten der Effizienz: Wesentlich voluminösere Leitgefäße, wie bei Laubbäumen üblich, würden einen höheren Durchsatz ermöglichen – allerdings um den Preis, dass schon wenige embolierte Gefäße zu erheblichen Problemen in der Versorgung von Ästen und Grün mit Wasser führen können.

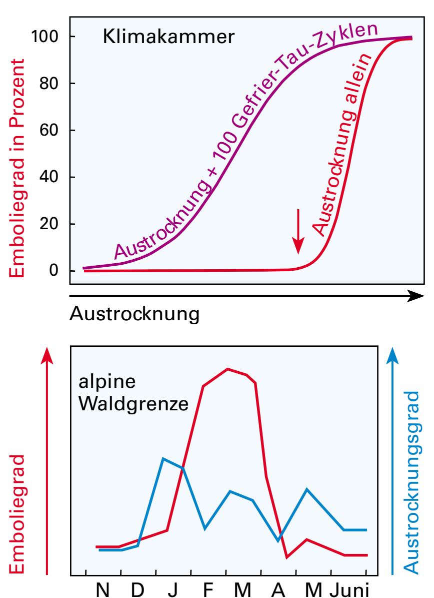
Nadel- wie Laubbäumen hilft aber auch eine spezielle »hydraulische Architektur« weiter. Zum einen werden dadurch wichtige Teile wie der Haupttrieb gegenüber untergeordneten Ästen effizienter mit Wasser versorgt. Zum anderen sind systematisch Soll-Schwachstellen eingebaut, an denen Embolien zuerst auftreten, etwa an seitlichen Abzweigungen. Betroffene Äste können vom Transportsystem des restlichen Baums abgeschottet werden. Dies bedeutet zwar unter Umständen ihr Absterben, doch der Rest profitiert.

Rätselhaftes Wiederbefüllen

Von einigen Arten ist auch bekannt, dass sie ihr durch Embolien beeinträchtigtes Wassertransportsystem reparieren oder erneuern können. Bei Eichen etwa, die nur in tieferen Lagen gedeihen, entstehen durch Gefrier-Tau-Vorgänge sogar in allen großen Gefäßen Embolien. Im Frühjahr, wenn ein neuer Jahresring zu wachsen beginnt, bilden diese Bäume aber zum Ausgleich zunächst rasch neue weite Gefäße. Der Preis: Sie treiben erst spät im Frühling aus.

Eine echte Reparatur ist das Wiederbefüllen embolierter Leitelemente. Einige Baumarten, wie Ahorn oder Birke, können in den Wurzeln und im Stamm einen Überdruck im Wassertransportsystem erzeugen, mit dessen Hilfe das Nass in die luftgefüllten Leitelemente gepresst wird. Sie »bluten« zu diesem Zeitpunkt bei Verletzung stark. Wie jedoch Nadelbäume, die allgemein über keinen derartigen Mechanismus verfügen, das bewerkstelligen, ist völlig unklar. In der Regel steht die Wassersäule der noch ge-





Winterliche Schönwetterperioden – mit hoher Strahlung tagsüber und starker Abkühlung nachts – bewirken zahlreiche Gefrier-Tau-Zyklen im Holz von Bäumen an der alpinen Waldgrenze. Bei künstlicher Austrocknung in der Klimakammer (rote Kurve oben) treten Embolien erst ab einer artspezifischen Schwelle (Pfeil) auf. Bei zusätzlichen Gefrier-Tau-Zyklen (violette Kurve) geschieht das schon viel eher und stärker. In einer Fichte an der alpinen Waldgrenze stieg mit der Austrocknung (blau) der Emboliegrad (rot) bis in den Spätwinter an. Im Frühjahr konnte sie die Leitbahnen wieder auffüllen. Die Embolien treten ungleichmäßig verteilt in den Ästen auf. Im Querschnitt erscheinen solche Bereiche hier ungefärbt (rechts oben).

füllten Elemente unter Zugspannung, sodass jeder Tropfen, der in ungefüllte Teile übertritt, zurückgesogen werden würde. Trotzdem stellten wir bei embolierten Nadelbäumen an der alpinen Waldgrenze mit dem Ende des Winters ein fast komplettes Wiederbefüllen fest. Möglicherweise spielen lebende Zellen in der Nachbarschaft der Bahnen eine Rolle, vielleicht auch noch nicht erkannte physikalische Mechanismen.

Warum interessiert uns Botaniker aber so sehr, was an der alpinen Waldgrenze im Winter passiert? Wir wollen unter anderem endlich herausfinden, aus welchen physiologischen Gründen die Lebensform »Baum« nicht auch weiter oben gedeiht. Die entdeckten Winterembolien bei Fichten, Lärchen und Latschen könnten einen wichtigen limitierenden Faktor darstellen, zumal bereits wenige hundert Meter unterhalb der Waldgrenze bei den beiden ersten Arten keine mehr nachweisbar sind (die Latsche gedeiht dort unten nicht).

So simpel das Ergebnis klingt, so schwierig erwiesen sich die Untersuchungen selbst, nicht nur wegen der auch für Menschen oft sehr unangenehmen Witterungsbedingungen. Um das Auftreten artifizieller Embolien zu vermeiden, wurden beispielsweise alle entnommenen Holzproben sofort unter mitgeführtes Wasser getaucht – bei Minusgraden und eisigem Wind keine Freude. Dass einem beim Aufstieg mit Tourenskiern und einem Rucksack voller schwerer Ausrüstungsgegenstände soeben noch viel zu warm war, konnte nur schwach trösten.

Durch ihren aufrechten Habitus sind Bäume den extremen winterlichen Bedingungen der Atmosphäre besonders ausgesetzt – und damit sowohl der Frosttrocknis als auch den beinahe täglichen Gefrier-Tau-Vorgängen an der Waldgrenze. Um uns ein genaues Bild über Monate zu verschaffen, haben wir Thermoelemente in einzelnen Bäumen, auch in Stamm und Boden verteilt und an ebenfalls hochgeschleppte Registriereinrichtungen und Solarpaneele angeschlossen. Der Emboliegrad der Holzproben, Stücke einzelner Äste, wurde »unten« in unserem Labor gemessen. Und schließlich haben wir an eingetopften jungen Bäumen in Klimakammern analysiert, wie sich der Emboliegrad bei zunehmender Trockenheit allein und in Kombination mit Gefrier-Tau-Zyklen verändert.

So konnten wir nachweisen, dass an der Waldgrenze beide Stressfaktoren an der Entstehung von Embolien beteiligt sind. Allerdings ist ein Baum nicht mit allen seinen Teilen gleichermaßen solchem Stress ausgesetzt – man denke nur an Sonnen- oder Schattenäste –, und das spiegelt sich in großen Unterschieden im Emboliegrad wider.

Laub abwerfende Bäume und die Nadeln abwerfende Lärche transpirieren im Winter kaum, andere Nadelbäume aber müssen für besonders guten Verdunstungsschutz ihres Grüns sorgen, wenn sie an der Waldgrenze überleben wollen. Hier ist die Zirbe mit ihrem vierfach besseren Verdunstungsschutz als die Fichte, zumindest in den Zentralalpen, eindeutiger Gewinner: Ein Bestand liegt sogar noch in etwa 2400 Meter Höhe. Vor allem wegen des guten Schutzes konnten wir bei ihr unter natürlichen Bedingungen keine Embolien nachweisen. Das ist für den Baum besonders im Frühjahr relevant. Erst noch zu beseitigende Beeinträchtigungen im Wassertransportsystem würden die mögliche Wachstumsperiode verkürzen, die oben an der Waldgrenze ohnehin nur wenige Wochen dauert. Das mag auch ein Grund sein, warum die schlechter angepasste Fichte eher an ihr Limit stößt. Embolien könnten somit das Überleben von Bäumen an der alpinen Waldgrenze maßgeblich beeinflussen. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Stefan Mayr, Professor am Botanischen Institut der Universität Innsbruck, konzentriert sich seit etwa fünf Jahren auf die Erforschung von Baumembolien. 2004 wurde er mit einem APART-Stipendium der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ausgezeichnet. **Dominik Zeillinger** ist Mathematiker und arbeitet nebenberuflich als Wissenschaftsjournalist.

The limits to tree height. Von G.W. Koch et al. in: Nature, Bd. 428, S. 851, 2004

Winter at the alpine timberline: Why does embolism occur in Norway spruce but not in stone pine? Von S. Mayr et al. in: Plant Physiology, Bd.131, S. 780, 2003

Repeated freeze-thaw cycles induce embolism in drought stressed conifers. Von S. Mayr et al. in: Planta, Bd. 217, S.436, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Relativität, Quantentheorie und Große Vereinigung

So erfolgreich die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein ist – sie bleibt eine klassische Beschreibung, die keine Quanteneffekte berücksichtigt. Hermann Nicolai, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam, beschreibt im Gespräch mögliche Wege, zu einer vereinheitlichten Theorie zu kommen.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Nicolai, 1916 erschien in den »Annalen der Physik« Albert Einsteins fundamentale Arbeit zur Allgemeinen Relativitätstheorie. Damit präsentierte er 250 Jahre nach Isaac Newton, der das Gravitationsgesetz aufgestellt hatte, eine völlig neuartige Beschreibung der Schwerkraft. Könnten Sie die grundlegenden Prinzipien der Einstein'schen Theorie erläutern?

Hermann Nicolai: Einstein hatte bereits 1905, als er die Spezielle Relativitätstheorie vorlegte, gemerkt, dass diese nicht mit der Newton'schen Beschreibung der Gravitation zusammenpasst. Er brauchte zehn Jahre, um einen Weg zu finden, die Gravitation mit einzubeziehen. Der Durchbruch gelang, als er die Annahmen, die in die Spezielle Relativitätstheorie eingehen, grundlegend erweiterte und die Vorstellung, Raum und Zeit seien flach, fallen ließ. Die zentrale Aussage der Allgemeinen Relativitätstheorie ist nun die, dass die Gravitation sich als Effekt der Krümmung von Raum und Zeit verstehen lässt.

Spektrum: Lassen sich denn Raum und Zeit geometrisch beschreiben?

Nicolai: Ja. Wenn wir uns nur in der Umgebung unseres Wohnorts aufhalten, sind wir der Meinung, die Erdoberfläche sei flach. Eine Karte dieser Gegend hätte ein Koordinatennetz aus zwei zueinander senkrechten Sätzen von parallelen Linien. Versuchen Sie mal, ein solches gleichförmiges Gitter über die in Wahrheit kugelförmige Erde zu legen. Das funktioniert wegen der Erdkrümmung nicht. Längenkreise, die am Äquator noch parallel verlaufen, schneiden sich an den Erdpolen. So ähnlich hat man sich den gekrümmten Raum vorzustellen – wenn wir nur genau genug hinsehen, merken wir, dass er nicht flach ist, sondern gekrümmt. Und diese Krümmung ist letztlich die Ursache der Gravitation. Genau das hat Einstein mit seiner Theorie mathematisch beschrieben.

Spektrum: Newton hat das Gravitationsgesetz aufgestellt, Einstein die Schwerkraft als Krümmung der Raumzeit definiert – haben die Wissenschaftler damit ein schlüssiges Bild der Gravitation gewonnen?

Nicolai: Die Allgemeine Relativitätstheorie ist auch heute noch, also fast hundert Jahre später, die gültige Gravitationstheorie. Allerdings hat sie das Defizit, keine Quanteneffekte zu berücksichtigen. Solche Effekte kommen zum Tragen, wenn die Gravitationsfelder sehr stark sind, beispielsweise unmittelbar nach dem Urknall oder im Zentrum von Schwarzen Löchern. Man versucht deshalb seit geraumer Zeit, diese beiden zunächst unvereinbaren Theorien miteinander zu »versöhnen«.

Spektrum: Welche Ansätze gibt es dazu?

Nicolai: Zunächst möchte ich sagen, dass es eine der größten Herausforderungen für die theoretische Physik überhaupt ist, die Quantentheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie zusammenzubringen – sicher eine Aufgabe für das 21. Jahrhundert. In ihren gegenwärtig bekannten Formen passen beide Theorien nach wie vor nicht zusammen, und in irgendeiner Weise muss man über diese bisherigen Formen hinausgehen, um das Ganze sinnvoll zu machen. Aus der Reihe von Ansätzen, die es hierzu gibt, ragen zwei besonders heraus: die Stringtheorie und die Loop-Quantengravitation.

Der eindeutig führende Kandidat ist die Stringtheorie, welche postuliert, dass die Allgemeine Relativitätstheorie selbst nicht fundamental ist, sondern eine effektive Näherung einer noch umfassenderen Theorie darstellt.



MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK (ALBERT-EINSTEIN-INSTITUT)

▲ **Fadenförmige Anregungen, so genannte Strings, könnten im Innern aller bekannten Teilchen stecken. In dieser Illustration hinterlassen die Schwingungen eines Strings (weiße Schleife) ein schlauchartiges Abbild in der Zeit.**

Spektrum: Was ist der Ausgangspunkt der Stringtheorie?

Nicolai: Wendet man die üblichen Methoden der Quantenfeldtheorie auf die Einstein-Theorie an, so erhält man unsinnige Resultate. Offenbar lassen sich diese nur vermeiden, wenn man die Einstein'sche Theorie radikal modifiziert. Die Stringtheorie ist eine solche radikale Modifikation: Sie postuliert, dass die fundamentalen Bestandteile der Materie keine punktförmigen Teilchen mehr sind, sondern fadenförmige Anregungen – so genannte Strings. Analysiert man nun das Anregungsspektrum dieser Strings, so kommt unter anderem eine Anregung der Elementarteilchen heraus, die genau die Eigenschaften des Gravitons aufweist, des Trägerteilchens der Gravitation.

Spektrum: In diesem Sinn enthält also die Stringtheorie die Gravitation.

Nicolai: Man kann es vielleicht so ausdrücken: Die Stringtheorie sagt die Existenz der Gravitation voraus, aber eben noch sehr viel mehr. Wir Physiker hoffen deshalb, auf diese Weise eine Vereinigung sämtlicher bekannter physikalischer Gesetze zu erreichen, insbesondere eine Vereinigung der Allgemeinen Relativitätstheorie mit dem Standardmodell der Teilchenphysik.

Spektrum: Also eine Vereinigung der Gravitation mit den anderen Grundkräften der Natur …

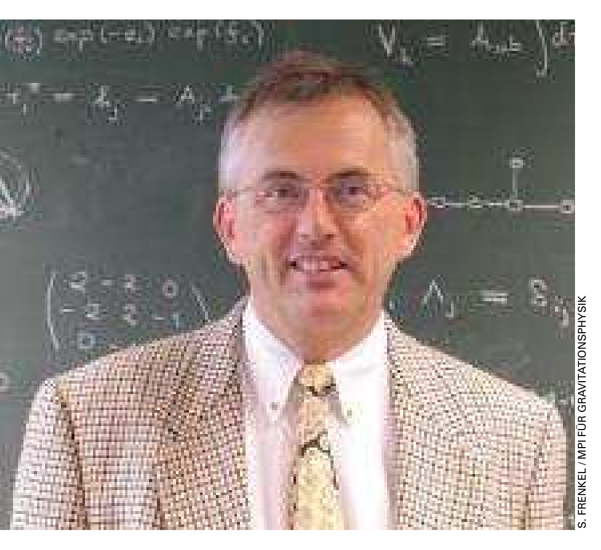
Nicolai: Ja. Im Standardmodell sind bereits drei der heute bekannten vier Wechselwirkungen vereinigt – starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung. Und diese Vereinigung im Rahmen der so genannten Quantenfeldtheorien war und ist höchst erfolgreich. Insbesondere hat sie sehr präzise Voraussagen für experimentelle Tatbestände ermöglicht, die sich mit großen Teilchenbeschleunigern bestätigen ließen – wie beispielsweise die Entdeckung der *W*- und *Z*-Bosonen, welche die schwache Wechselwirkung vermitteln.

Spektrum: Ist denn zu erwarten, dass vereinigte Theorien – konkret: die Stringtheorie oder die Loop-Quantengravitation – ähnlich präzise Voraussagen machen?

Nicolai: Das ist derzeit eines der großen ungelösten Probleme. Die Stringtheorie hat zumindest das Potenzial, den in unseren Beschleunigerexperimenten zugänglichen Bereich niedriger Energien zu erklären. Sie beschreibt ja eine Welt, die neben den vier Dimensionen unserer Raumzeit noch sechs zusätzliche Raumdimensionen aufweist. Wenn man sich diese zusätzlichen Dimensionen gewissermaßen aufgerollt vorstellt, derart, dass sie unserer Wahrnehmung entgehen, kommt jeweils eine bestimmte Niederenergiewelt dabei heraus. In manchen Fällen ähnelt sie der Struktur, die wir kennen, die also dem Standardmodell der Teilchenphysik entspricht. Das Problem der Stringtheorien ist, dass es zu viele Möglichkeiten gibt – darunter auch solche, die mit unserer Welt, wie wir sie kennen, überhaupt nichts zu tun haben.

Spektrum: Wie sieht es bei der Loop-Quantengravitation aus?

Nicolai: Diese Theorie hat nicht den Ehrgeiz, eine Vereinheitlichung zwischen Einstein und dem Standardmodell herbeizu- ▷



S. FRENKEL / MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

Forscht über Quantengravitation, die Vereinigung der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantenphysik: Hermann Nicolai, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam-Golm

führen. Sie geht vielmehr von der Hypothese aus, dass Einsteins Theorie allein für sich schon konsistent quantisiert werden kann. Diese Annahme steht somit im Widerspruch zur Ausgangshypothese der Stringtheoretiker.

Die Loop-Quantengravitation macht deshalb keinerlei Aussage über das Niederenergiespektrum der Elementarteilchen. Auch hat sie große Schwierigkeiten zu erklären, wie eine glatte Raumzeit überhaupt zu Stande kommt, wie also die bekannte Einstein'sche Theorie als Näherung herauskommt, die dann durch Terme zu korrigieren wäre, die den Quanteneffekten entsprechen.

Spektrum: Es ist schon eine seltsame Vorstellung, dass Stringtheorien in der Regel für eine zehndimensionale Raumzeit formuliert werden und sechs Raumdimensionen davon aufgerollt sein sollen, damit man unsere vertraute Raumzeit bekommt. Warum ausgerechnet sechs aufgerollte Dimensionen und nicht weniger oder sogar mehr?

Nicolai: Bei den Stringtheorien wird die Reduzierung von zehn auf vier Dimensionen nicht unbedingt von der Theorie selbst vorhergesagt; es gibt sehr viele andere Möglichkeiten – so kann die Theorie auch für alle Zeiten in zehn Dimensionen weiterleben. Das ist ein etwas unbefriedigender Zug. Andererseits gibt es eine spezielle Erweiterung der Stringtheorie, die so genannte M-Theorie, bei der man vermutet, dass sie sogar in elf Dimensionen existiert. Die umfassendste Feldtheorie, die man kennt, ist auch eine solche elfdimensionale Theorie, die Supergravitationstheorie. Diese sagt nun interessanterweise eine bevorzugte Reduzierung auf vier Dimensionen voraus.

Spektrum: Das ist eine inhärente Eigenschaft der Theorie?

Nicolai: Ja, und man weiß das in diesem Fall schon seit mehr als zwanzig Jahren. Nur ist es damals und bis heute nicht gelungen, die Reduzierung der Dimensionenzahl so einzurichten, dass sie mit dem Standardmodell der Teilchenphysik zusammenpasst. Die Stringtheorie ist zunächst einen ganz anderen Weg gegangen; dort kommt man dem Standardmodell näher.

Spektrum: Wie wird die Dimensionsfrage in der Loop-Quantengravitation behandelt, die eine diskrete, also nicht kontinuierliche Raumzeit postuliert?

Nicolai: Diese Theorie funktioniert überhaupt nur in vier Dimensionen; sie geht davon aus, dass die Einstein-Theorie, so wie sie ist – in vier Dimensionen –, fundamental ist. Darin kann man einen Vorteil der Loop-Quantengravitation gegenüber der Stringtheorie sehen.

Spektrum: Ursprünglich hatte Einstein in seinen Gleichungen auch ein so genanntes kosmologisches Glied stehen, das er aber rasch wieder verwarf und gleich null setzte …

Nicolai: Diese kosmologische Konstante hat heute wieder eine große Bedeutung. Wir brauchen sie, um zu erklären, dass unser Universum expandiert, und zwar mit immer höherer Geschwindigkeit – das haben Astronomen 1998 durch Beobachtungen festgestellt.

Spektrum: Sehen Sie in den vereinigten Theorien und insbesondere den Stringtheorien eine Möglichkeit, den Wert der Einstein'schen kosmologischen Konstanten zu bestimmen?

Nicolai: Die Berechnung dieses Parameters ist zweifellos ein sehr schwieriges Problem. Zunächst muss festgestellt werden, ob die Stringtheorie überhaupt kompatibel mit einer positiven kosmologischen Konstante ist.

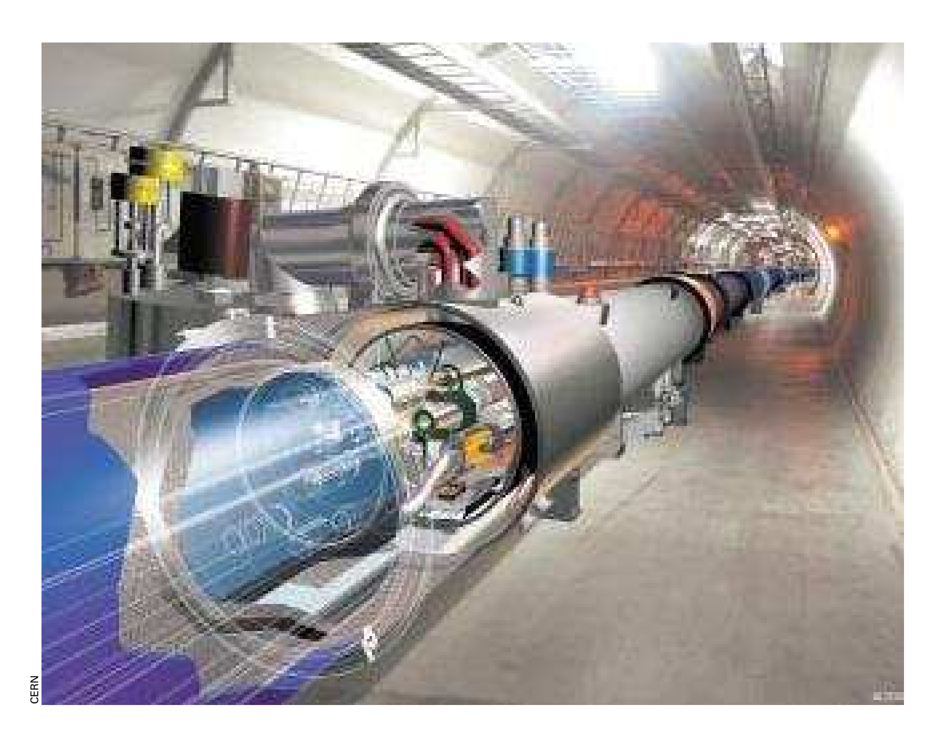
Spektrum: Zur Erklärung der beschleunigten Expansion des Universums muss die kosmologische Konstante wohl positiv sein …

Nicolai: Ja; eines unter mehreren Problemen ist dabei, dass die Stringtheorie, wie wir sagen, supersymmetrisch sein muss – jedem Teilchen wäre damit ein supersymmetrischer Partner zuzuordnen, so



MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK (ALBERT-EINSTEIN-INSTITUT)

Die Loop-Quantengravitation beschreibt die Quantenzustände der Raumzeit als Spin-Schäume: Der Raum besteht aus diskreten Volumenstücken, und auch die Zeit schreitet in kleinen Sprüngen voran.



Der Large Hadron Collider LHC – hier in einer Computergrafik – soll 2007 in Betrieb gehen. Mit diesem 27 Kilometer langen Ringbeschleuniger suchen die Wissenschaftler nach bisher unbekannten Teilchen.

wie es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt. Es ist sehr schwierig, die Supersymmetrie unter einen Hut zu bekommen mit einer positiven kosmologischen Konstante. Genauer gesagt: Supersymmetrie passt nicht zu einer positiven kosmologischen Konstante, sondern nur zu einer negativen. Die Supersymmetrie muss deshalb in geeigneter Weise gebrochen werden.

Spektrum: Stringtheorien ohne Supersymmetrie sind nicht gangbar?

Nicolai: Doch, es gibt sehr wohl nicht-supersymmetrische Stringtheorien – nur sind die leider alle mit irgendwelchen schweren Mängeln behaftet. In der Regel äußert sich das in der Existenz von Tachyonen, das sind Teilchen, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen müssten. Der große Vorteil der Supersymmetrie ist, dass sie solche Tachyonen vermeidet. Wenn man nun aber die Supersymmetrie bricht, kommt das Tachyon sozusagen durch die Hintertür wieder herein.

Spektrum: Bleiben wir noch einen Moment bei supersymmetrischen Teilchen. Die Suche danach ist eines der wesentlichen Forschungsprogramme für den Large Hadron Collider LHC, der gegenwärtig am Cern in Genf gebaut wird. Können Sie aus Ihrer Warte als Theoretiker einen Hinweis geben, wie gut die Aussichten sind, solche Teilchen zu finden?

Nicolai: Die Aussichten, etwas Neues zu finden, sind nach meiner Überzeugung sehr gut. Was für Teilchen das genau sein werden, ist aber noch nicht so klar. Die theoretische Physik hat in den letzten zwanzig Jahren ein enormes Arsenal an Modellen und Theorien zusammengetragen. Darunter hat die Supersymmetrie eine ganz hervorgehobene Stellung; ich denke, wir müssen jetzt einfach das Experiment entscheiden lassen, was davon richtig ist. Dazu müssen wir uns wohl aber bis 2008 in Geduld üben.

Spektrum: Gibt es denn prinzipiell die Möglichkeit, durch Experimente im Labor oder astrophysikalische Messungen herauszufinden, ob die Stringtheorie oder die Loop-Quantengravitation die geeignetere Beschreibung unserer Welt ist?

Nicolai: Ja, da gibt es eine ganze Reihe von Möglichkeiten. Dabei kann jedoch die Loop-Quantengravitation nichts über Beschleunigerexperimente sagen. Die Superstringtheorien und supersymmetrische Feldtheorien machen ganz klare Aussagen, dass da etwas passieren könnte. Und wenn man ein supersymmetrisches Teilchen findet, dann wäre das ein wichtiger und aufregender Hinweis auf neue Physik.

Im Elementarteilchenbereich hat damit eigentlich nur die Superstringtheorie Chancen, »gesehen« zu werden. Im astrophysikalischen Bereich ist es ein bisschen anders, aber auch hier hat die Stringtheorie möglicherweise etwas zu sagen. So hat es in den letzten Monaten einige Aufregung gegeben über die theoretische Möglichkeit, kosmische Strings zu entdecken. Sie können in bestimmten Situationen heftige Gravitationswellen abgeben, die mit den irdischen Gravitationswellendetektoren zu registrieren sein sollten.

Eine weitere Möglichkeit bietet die detaillierte Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung, deren Fluktuationen Aufschluss über Quanteneffekte im frühen Universum geben könnten.

Spektrum: Wo steht die theoretische Forschung Ihres Instituts im internationalen Vergleich?

Nicolai: In den USA sind die Gebiete, die wir hier besprochen haben, sehr deutlich getrennt. Dort hat die Stringtheorie ein großes Übergewicht an Universitäten wie Harvard, Princeton, Stanford oder Berkeley. Loop-Quantengravitation wird zentral eigentlich nur an der Pennsylvania-State-Universität und in Kanada vorangetrieben. Es gibt dort sehr wenig Kommunikation über den Zaun, auch keine gemeinsamen Konferenzen. Das ist bei uns etwas anders; wir pflegen am Institut beide Richtungen, und im Jahr 2003 hatten wir eine Konferenz »Strings meet Loops«, die einiges Aufsehen erregt hat.

Spektrum: Gibt es neben diesen beiden Hauptrichtungen zur Vereinigung der Gravitation mit den Standardmodell-Wechselwirkungen noch andere Erfolg versprechende Denkrichtungen?

Nicolai: Es gibt noch eine ganze Menge anderer Ansätze, die aber nicht so prominent sind. Und zum Teil lassen sie sich weder an die Einstein-Theorie noch an das Standardmodell anbinden – damit bleiben sie vorläufig Glasperlenspiele. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Die Fragen stellten **Uwe Reichert**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft, und **Georg Wolschin**, Privatdozent und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Einstein und die Folgen. Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2005

Quanten der Raumzeit. Von Lee Smolin in: Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 54

Der große Hadronen-Collider. Von Chris Llewellyn Smith in: Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 68.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Ein mechanisches Gedächtnis

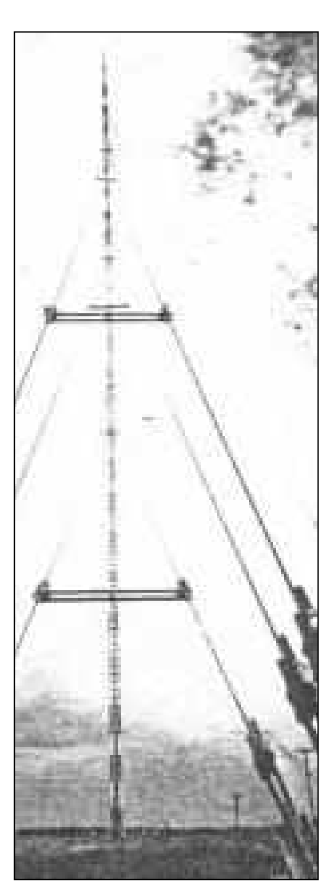
»Ein wissenschaftlicher ›Denkautomat‹, der in der Minute 500 000 Formeln und Daten aus der Chemie und der Biologie nennen kann, wurde in Washington vorgeführt. Amerikanische Wissenschaftler haben das elektronische Gerät neun Jahre lang mit Angaben auf 1,5 Millionen Lochkarten ›gefüttert‹, die zusammen alle bekannten Informationen über etwa 50 000 organische und anorganische Verbindungen enthalten … Die Anlage soll so erweitert werden, daß sie auch physikalische Daten aufnehmen kann.« *(Universitas, 10. Jahrgang, Heft 5, S. 546, Mai 1955)*

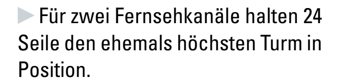
Bienenstock als Geigerzähler

»Die radioaktive Durchseuchung stellt eine rasch zunehmende Gefahr für viele zivilisierte Länder … dar. Da nun Bienen das biologisch wichtige radioaktive Element Strontium 90 speichern, das bei Atomentladungen … entsteht, hat man neuerdings in der Nähe von Forschungszentren Bienenstöcke aufgestellt, die mit Geigerzählern versehen sind. Wenn die Bienen zum Stock zurückkehren, registriert der Geigerzäher die radioaktiven Spuren, und es läßt sich leicht erkennen, in welchem Ausmaß eine radioaktive Durchseuchung vorliegt.« *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, 80. Jahrgang, Nr. 20, S. 803, Mai 1955)*

Der höchste Turm der Welt

»Man hat sich in der Stadt Oklahoma entschlossen, einen Fernsehturm mit einer Reichweite von etwa 160 km zu errichten, der sowohl wegen seiner Höhe als auch wegen seiner Bauweise bemerkenswert ist. Der Turm ist mit seinen 479 m zur Zeit das höchste von Menschenhand errichtete Bauwerk … Die Stabilität wird durch 24 Halteseile gegeben, die in verschiedenen Höhen befestigt sind und in Abständen von 170 – 315 m vom Sockel verankert wurden. An der Spitze befinden sich die Antennen für zwei Fernsehkanäle, die durch Koaxial-Kabel gespeist werden.« *(ETZ-B, Bd. 7, Heft 5, S. 192, Mai 1955)*





Für zwei Fernsehkanäle halten 24 Seile den ehemals höchsten Turm in Position.





Die Wagen mit den Fähnchen zeigen deutlich an, ob die Dame oder der Herr kräftiger strampelt.

Fahrradwettrennen im Zimmer

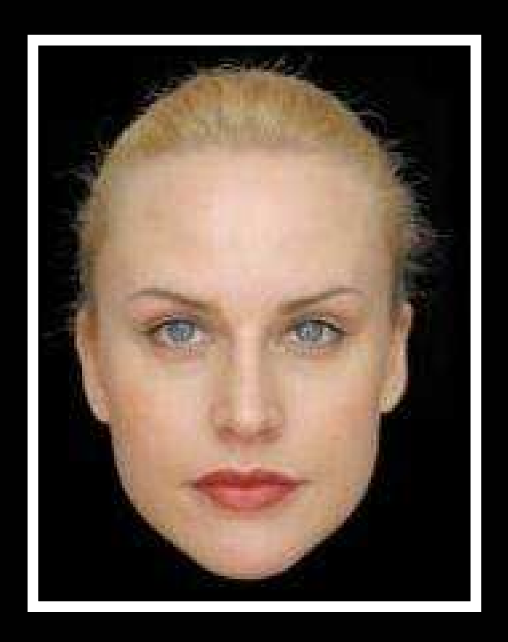
»Nicht selten werden Wettrennen für Radfahrer veranstaltet … doch lassen diese den Verlauf … nicht so deutlich erkennen … Bei dem Zimmervelodrom … schwebt das Hinterrad frei in der Luft, und seine Felge ist durch eine Übertragungsschnur mit einer Dynamomaschine verbunden. Ihr Strom … gelangt zu einem auf Rädern stehenden kleinen Motor. Je nach der Stromstärke, das heißt je nach der Arbeitsleistung des Radlers läuft dieser Motorwagen mehr oder weniger schnell … Zur besseren Unterscheidung tragen die Motorwagen Fahnen in verschiedenen Farben, die der Farbe des Rades … entsprechen und so die Übersicht erleichtern.« *(Das neue Universum, 26. Jahrgang, S. 446)*

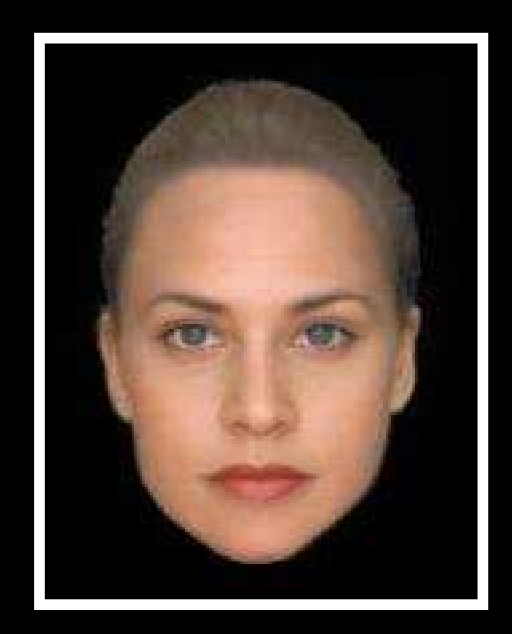
Bett gegen Seekrankheit

»In neuartiger Weise hat eine englische Gesellschaft den Kampf gegen die Seekrankheit aufgenommen: durch Konstruktion von Lagern, die stets horizontal bleiben. Das Vorbild dafür ist der Schiffskompass … Ein gewisses Hin- und Herschwingen bei der Grösse der bewegten Massen wäre unvermeidlich gewesen; dieses wird bei den neuen Lagern durch Bremsen gehindert … Gefässe an der Decke der Kabine enthalten Quecksilber, welches beim geringsten Neigen des Schiffes einen elektrischen Strom einschaltet, der die Bremsen betätigt und so das Schwingen verhindert.« *(Die Umschau, 9. Jahrgang, Nr. 21, S. 406, Mai 1905)*

Alt-ägyptischer Blasenstein

»Ein Blasenstein wurde vorgezeigt, den Professor Elliot Smith in einem Grab der vorgeschichtlichen Begräbnisstätte zu El Amrah in Ober-Aegypten vorgefunden … hat. Der Stein hatte in einem steinernen Gefäß gelegen, und … wird … auf wenigstens 7000 Jahre geschätzt … Aus seiner chemischen Zusammensetzung geht hervor, daß die vorgeschichtlichen Bewohner Aegyptens Fleischesser waren, also Jäger gewesen sein müssen, während die alten Aegypter der geschichtlichen Zeit hauptsächlich von Pflanzenkost gelebt haben.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 116, S. 319, Mai 1905)*





Menschenrassen – eine Fiktion?

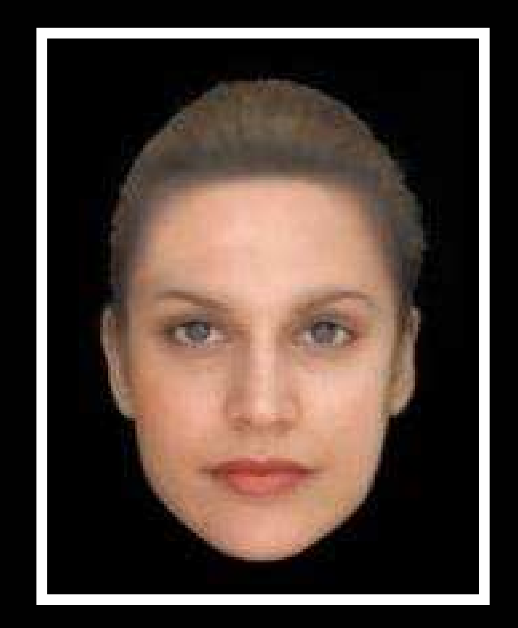
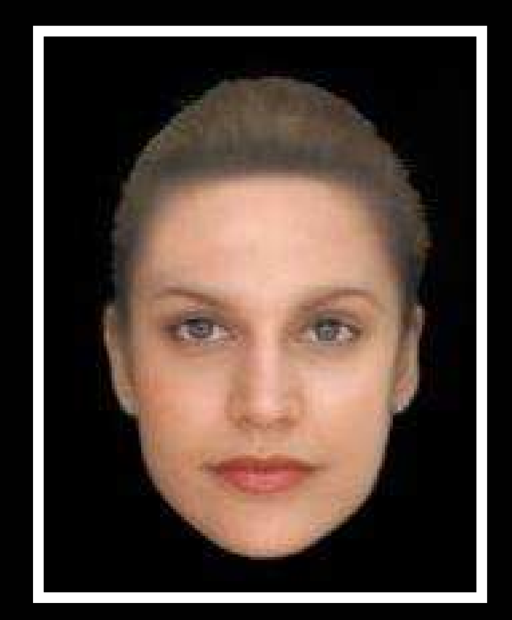
Genetische Studien zeigen: Streng getrennte ethnische Gruppen existieren nicht. Insgesamt unterscheiden sich Menschen verschiedener geografischer Herkunft zwar – doch die meisten Anlagen variieren nur statistisch.

Von Michael J. Bamshad
und Steve E. Olson

Helle oder dunkle Haut, krauses oder glattes Haar – anhand von äußerlichen Merkmalen wie diesen schließen wir gewöhnlich auf die ethnische, sprich geografische Herkunft eines Menschen oder seiner Vorfahren. Die Frage ist aber, wie stark sich die Menschengruppen der Kontinente genetisch wirklich voneinander unterscheiden – und auch, inwieweit sie genetisch getrennte Populationen bilden oder zumindest früher bildeten. Ist es aus biologischer Sicht sinnvoll, von Menschenrassen auszugehen? Das neuerliche Interesse vieler Forscher an genetischen Rassenunterschieden hat nicht zuletzt einen medizinischen Hintergrund. Dass die Häufigkeit mancher Erbkrankheiten statistisch je nach geografischer Herkunft variiert, ist schon lange bekannt. So ist die Mukoviszidose besonders unter Europäern (und deren Nachfahren) verbreitet. Die Sichelzellanämie hingegen trifft überwiegend Menschen aus Afrika und vom Mittelmeer.

Menschen sprechen aber auch zum Beispiel auf Arzneimittel individuell verschieden an. Mancher reagiert auf denselben Wirkstoff unerwartet stark, mancher zu schwach oder gar nicht (siehe Interview S. 96). Ob allerdings schon die ethnische Zugehörigkeit grundsätzlich gute Anhaltspunkte für eine Medikamentierung bietet, ist unter den Forschern noch strittig. Diese Diskussion entfachte in Amerika, als einige Studien ergaben, dass vielen Menschen schwarzafrikanischer Herkunft bestimmte Herz-Kreislauf-Mittel wenig helfen, während andere bei diesem Teil der Bevölkerung wiederum besser wirken als bei Weißen.

Im Gefolge der Entzifferung des menschlichen Genoms können Wissenschaftler die Zusammenhänge nun genauer untersuchen. Grob lassen sich die bisherigen Erkenntnisse so zusammen-


NANCY BURSON

Der Computer muss ein Porträtfoto nur wenig modifizieren, um ein Gesicht in das einer anderen Rasse zu verwandeln. Die New Yorker Künstlerin Nancy Burson sorgte mit ihrer »Menschenrassenmaschine« (»the human race machine«) für eine Attraktion des Londoner Millenium Domes. Die Besucher konnten sie an sich selbst ausprobieren.

fassen: Manche ethnischen Gruppen sind durchaus genetisch voneinander unterscheidbar. Allerdings hängt die Untergliederung teilweise von den jeweils ausgewählten Genen oder genetischen Abschnitten ab. Untersucht man andere Gene, kann es sein, dass man auch andere Gruppen definiert. Beispielsweise mag ein Mensch wegen der Gene für seine Hautfarbe in eine andere Gruppe passen als wegen der Gene für ein weiteres Merkmal.

Ganze Vielfalt der Menschheit fast schon in einer Population

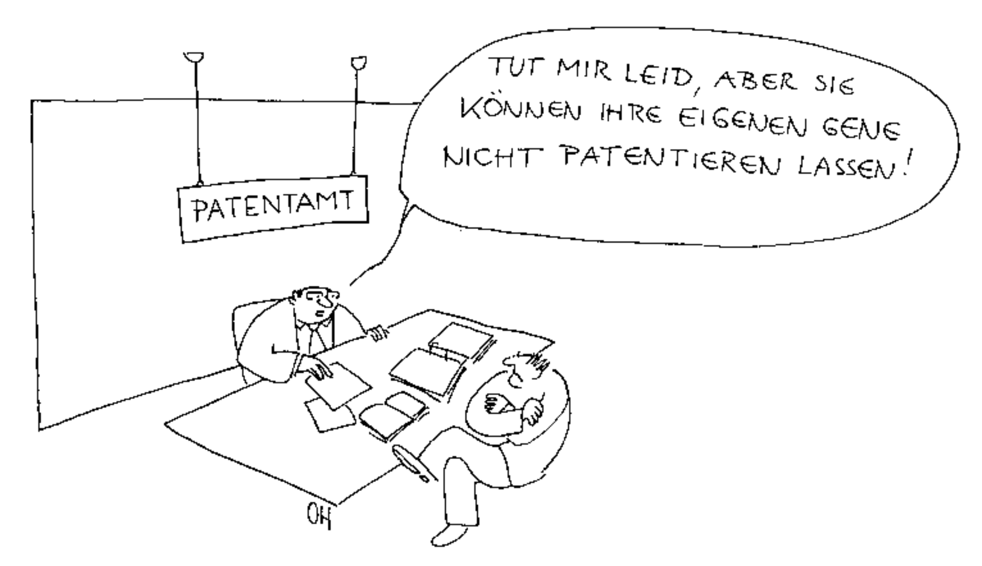
Als ein besonders wichtiges Ergebnis bewerten Anthropologen die immense genetische Variabilität innerhalb der Populationen der Kontinente und die im Vergleich dazu geringen Verschiedenheiten zwischen den Bevölkerungen der großen geografischen Regionen. Zu einem Großteil deckt sich die Variabilität innerhalb dieser Populationen mit der genetischen Vielfalt der gesamten Menschheit. Auf einem Kontinent trifft man rund 90 Prozent aller Variabilität an. Das heißt, im Grunde sind die Menschen eines Kontinents untereinander nur wenig ähnlicher als im Vergleich zu anderen Gruppen. Die Populationen unterscheiden sich voneinander nur in etwa 10 Prozent der menschlichen genetischen Gesamtvariabilität. Für eine Zuordnung zu einer bestimmten geografischen Region kann das allerdings oft genügen, wie nun nachgewiesen ist – doch nicht immer.

Nach Vorstellung der Anthropologen hat sich der so genannte anatomisch moderne Mensch – der moderne *Homo sapiens* – erst in den letzten 100 000 Jahren von Afrika aus, wo er entstand, über die Welt ausgebreitet. Es scheint nur eine relativ kleine Anzahl an Individuen gewesen zu sein, von denen vermutlich alle heutigen Menschen abstammen. An den Mutationen, die sich nach und nach in den einzelnen Linien anhäuften, lässt sich deren Verbreitungsgeschichte ablesen.

Um den Verwandtschaftsgrad zwischen Bevölkerungsgruppen zu bestimmen, nutzen Genetiker bestimmte so genannte Polymorphismen im Erbgut. Sie meinen damit in diesem Fall kleine Variationen – Abweichungen – zwischen praktisch gleichen Erbsträngen. Teilweise handelt es sich um Unterschiede in einzelnen Bausteinen (Basen) der DNA-Sequenzen, teilweise um mehr oder weniger kurze DNA-Stücke. Bei der Sequenzierung des menschlichen Genoms entdeckten die Forscher Millionen solcher genetischen Polymorphismen. Irgendwann sind die einzelnen Varianten neu aufgetreten und wurden an die Nachkommen weitergegeben. Deswegen kann man anhand dessen Entwicklungslinien herleiten.

Manche Polymorphismen betreffen Gene. Mitunter, aber durchaus nicht immer, resultieren dann Unterschiede in Körperbau oder Stoffwechsel, teilweise auch Erbkrankheiten – falls ein entscheidender Bereich des Gens betroffen ist. Für Stammbaumanalysen eignen sich oft selektionsneutrale Unterschiede besonders gut, also Abweichungen in den Erbsequenzen, die sich nicht auf Eigenschaften des Organismus auswirken. Solche neutralen Polymorphismen gibt es auch auf Genen. Ihre Mehrzahl liegt im menschlichen Genom aber auf den vielen Abschnitten, die keine Gene darstellen. Deren Verteilung über die Menschengruppen erlaubt einerseits Einblicke in die stammesgeschichtliche Vergangenheit und Verwandtschaft der menschlichen Populationen; andererseits geben manche Varianten, sofern sie Gene betreffen, Auskunft über Selektionswirkungen der Umwelt, denen die Gruppen ausgesetzt waren.

Ideal wären ethnische Gruppen anhand von Polymorphismen unterscheidbar, wenn einzelne genetische Varianten nur in einer einzigen Gruppe und bei sämtlichen ihrer Mitglieder auftauchten. So einfach sind die Verhältnisse zwischen den geografischen Großräumen allerdings nicht. Zum einen ist nicht viel ▷



▷ Zeit verstrichen, seit sich die großen menschlichen Bevölkerungsgruppen aufgetrennt haben. Zum anderen haben sich die Menschen auch zu stark untereinander vermischt.

Das bedeutet nun nicht, dass sich Bevölkerungen genetisch insgesamt gesehen überhaupt nicht unterscheiden würden. Die einzelnen Varianten von Polymorphismen verteilen sich durchaus nicht gleichmäßig über die Welt. Manche Ausprägungen treten in einer ethnischen Gruppe bei vielen Individuen auf, in einer anderen nur bei wenigen. Erfasst man viele Polymorphismen zugleich, ergeben sich für unterschiedliche Bevölkerungen durchaus charakteristische Muster, die zumindest grob eine Einteilung in verschiedene Gruppen erlauben.

Für solche Studien verwenden Populationsgenetiker unter anderem gern die so genannten Alu-Sequenzen (Alus), die an vielen Stellen im menschlichen Genom auftauchen und vielleicht drei Prozent davon ausmachen (siehe Kasten rechts). Es handelt sich um praktisch einheitliche, kurze DNA-Abschnitte aus bis zu ein paar hundert Basen mit jeweils fast der gleichen Basensequenz (abgesehen von einigen punktuellen Mutationen darin). Von Zeit zu Zeit entsteht von einer Alu-Sequenz eine Kopie, die dann irgendwo im selben oder in einem der anderen Chromosomen eingebaut wird. Gewöhnlich haben die Alu-Sequenzen auf die Funktion nahe gelegener Gene keinen Einfluss. Jeder Vorgang dieser Art ist einmalig und in der Regel bleibt die kopierte Alu-Sequenz fortan fest an Ort und Stelle sitzen, wird also an nachkommende Generationen weitervererbt. Wenn zwei Menschen genau die gleiche Alu-Sequenz an genau derselben Stelle im Genom tragen, müssen sie dieses DNA-Stück folglich vom selben Vorfahren geerbt haben.

Weil sich die Chromosomen von Vater und Mutter bei jeder Befruchtung aufteilen und neu mischen – und zudem bei der Reifeteilung der Keimzellen gleiche Chromosomen ganze Abschnitte vertauschen –, sortieren sich auch die vielen Alu-Sequenzen immer wieder anders. Jedes Individuum trägt eine große Anzahl davon, die aus ganz verschiedenen Ahnenlinien stammen können. Darum erkennt man am Muster von Alu-Sequenzen Herkunft und Verwandtschaft von Individuen.

Die Frage war: Kann man allein anhand von Alu-Sequenzen die geografische Herkunft von Menschen bestimmen? Zusammen mit Wissenschaftlern der Universität von Utah in Salt Lake City und der Louisiana State University in Baton Rouge untersuchte einer von uns (Bamshad) genetische Proben von 565 Menschen auf 100 definierte Alu-Polymorphismen. Absichtlich wählten wir räumlich weit getrennte Regionen. Die Teilnehmer stammten von Geburt aus Schwarzafrika, aus Asien und aus Europa. Nachdem wir registriert hatten, welche Ausprägungen bei welchen Personen vorkamen – und welche nicht –, verdeckten wir sämtliche Identifikationsmerkmale. Die reinen genetischen Muster versuchten wir dann in Gruppen zu sortieren.

Klares Bild für ferne Gruppen

Das gelang tatsächlich. Wir ermittelten vier unterscheidbare Einheiten. Als wir nun nachsahen, welche Individuen in welche Gruppen fielen, bekamen wir ein klares Bild: Zwei Gruppen bestanden nur aus Menschen aus Schwarzafrika (zu einer davon gehörten hauptsächlich Mbuti-Pygmäen, die wir absichtlich aufgenommen hatten), eine Gruppe setzte sich rein aus gebürtigen Europäern zusammen, die Personen der vierten Gruppe kamen alle aus Ostasien. Wie wir in dieser Studie außerdem feststellten, bestand bei Berücksichtigung von 60 Alu-Polymorphismen eine Gewähr von 90 Prozent, dass wir eine Person dem richtigen Kontinent zuordneten. Erst mit ungefähr 100 Polymorphismen bekamen wir fast immer das treffende Resultat.

Studien mit anderen Formen von Polymorphismen brachten ähnliche Ergebnisse. Genetiker der Universität Stanford (Kalifornien) etwa verglichen die Verteilung der verschiedenen Ausprägungen von so genannten Mikrosatelliten, ganz kurzen, mehrfach wiederholten Basen-Sequenzen (deswegen auch *short tandem repeats* genannt, siehe Kasten S. 94). Dabei variiert die Zahl der Wieder-

IN KÜRZE

▶ Was wir beim Menschen als **äußerliche Rassenmerkmale** einstufen, wie Hautfarbe oder Haarstruktur, beruht auf Unterschieden (**Polymorphismen**) in ganz wenigen Genen. An sich sind die Menschengruppen in sich genetisch oft so vielfältig, dass sich Angehörige derselben Bevölkerungsgruppe manchmal genetisch mehr unterscheiden als Menschen aus verschiedenen Populationen. Die genetische Variabilität innerhalb der Gruppen ist deutlich größer als die zwischen Gruppen.

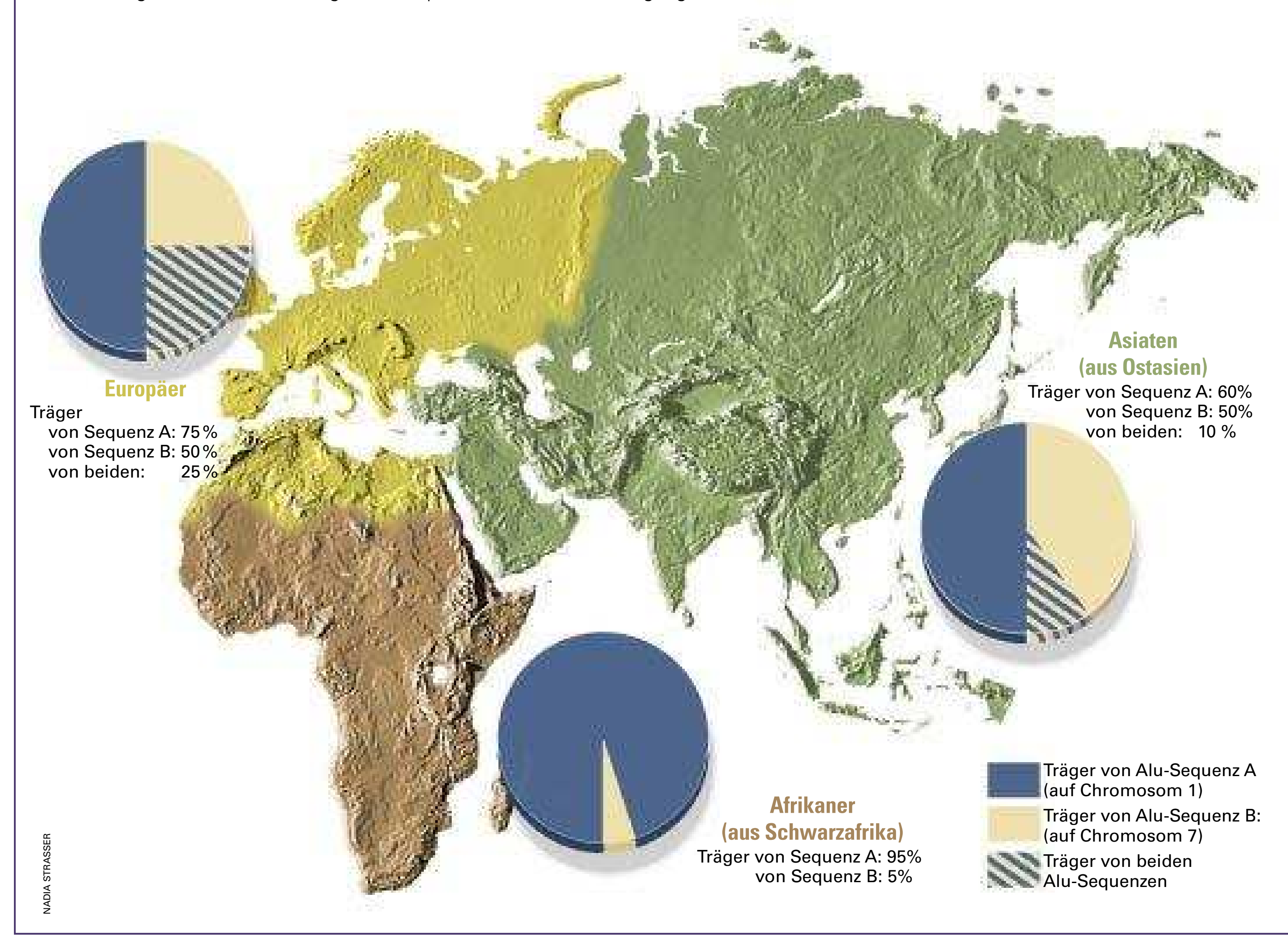
▶ Großenteils unterscheiden sich **Populationen aus verschiedenen geografischen Räumen** weniger darin, welche genetischen Varianten bei ihnen vorkommen, als darin, wie häufig die einzelnen Varianten vertreten sind. Manche Bevölkerungsgruppen lassen sich an der Häufigkeitsverteilung genetischer Varianten tatsächlich kennzeichnen. Das gelingt mitunter jedoch nicht, wenn sich in einer Region verschiedene Menschengruppen erst in jüngerer Zeit vermischt haben.

▶ Die Medizin findet teils gravierende individuelle **Unterschiede in den genetischen Voraussetzungen** für Krankheiten. Gleiches gilt für die körperliche Reaktion auf Medikamente. Noch ist umstritten, inwieweit sich Ärzte dabei auch an der ethnischen Zugehörigkeit des Patienten orientieren sollten.

Wo die genetische Vielfalt wirklich steckt

Um Populationen genetisch zu charakterisieren, eignen sich beispielsweise so genannte Alu-Sequenzen: kurze DNA-Abschnitte ohne bekannte Funktion. Sie werden hin und wieder kopiert und die Kopien an neue Stellen im Genom eingebaut. Einmal intergrierte Sequenzen bleiben am selben Ort. Die Verteilungsmuster der Alu-Sequenzen geben somit Aufschluss über die Abstammung von Individuen und deren Verwandtschaft – bis hin zu den genetischen Beziehungen von Populationen.

Beispielhaft ist hier wiedergegeben, wie oft zwei definierte Alu-Sequenzen bei Asiaten, Schwarzafrikanern und Europäern vorkommen. Verglichen werden Genome von Menschen, die äußerlich den herkömmlich unterschiedenen Menschenrassen gut entsprechen, somit aus geografisch entfernten Regionen stammen. Selbst da wird deutlich: Erst wenn man eine große Anzahl Alu-Sequenzen einbezieht, kann man auf diese Weise die geografische Herkunft eines Menschen sicher herleiten.



NADIA STRASSER

holungen derselben Bausteinfolge, und diese Muster vererben sich. Die Forscher prüften genetische Proben von über 1000 Menschen auf fast 375 unterschiedliche solcher Mikrosatelliten-Polymorphismen. Die Personen entstammten 52 Ethnien Afrikas, Asiens, Europas und Nord- sowie Südamerikas.

Aus der Verteilung von verschieden langen Tandems dieser Mikrosatelliten bestimmten die Genetiker fünf große Gruppen. Bezeichnenderweise lebten deren Vorfahren jeweils in geografisch durch Meere, Wüsten oder Gebirge getrennten Regionen. Eine Einheit umfasste Schwarzafrikaner; eine andere Europäer und Asiaten aus Gebieten westlich des Himalaya; eine weitere Ostasiaten; die nächste Bewohner von Neuguinea und Melanesien; und die fünfte Indianer. Für jede Region ergaben sich zudem Untergruppen, die meist mit den Ethnien übereinstimmten, welche die Teilnehmer für sich angegeben hatten.

Zwar scheinen diese Ergebnisse anzudeuten, dass es mit solchen genetischen Analysen gelingt, eine geografische Unterscheidung von Bevölkerungsgruppen zu treffen. Dennoch sollte man bei der Interpretation vorsichtig sein. Am klarsten zeichnen sich oft spezifische genetische Gruppenprofile ab, wenn man Menschen untersucht, die aus weit voneinander entfernten Regionen stammen. Solche Gruppen enthalten wohl schon deswegen in höherem Maße unterschiedliche Anteile der gesamten genetischen Variabilität des Menschen, weil sie sich gewöhnlich kaum direkt mischen. ▷

Für manche Regionen gelingt es nämlich nicht so gut, eine eigene, in sich einheitliche Gruppe zu definieren: Als Bamshad und Mitarbeiter das mit den 100 Alu-Polymorphismen für Südindien versuchten, scheiterten sie. Denn ein Teil der Bevölkerung hatte genetisch mehr mit Europäern gemeinsam, ein anderer mehr mit Asiaten. Darin spiegelt sich die bewegte Besiedlungsgeschichte des Subkontinents. Wahrscheinlich müsste man viel mehr Polymorphismen vergleichen, vielleicht Tausende, wollte man solche Mischbevölkerungen charakterisieren.

Die Hautfarbe kann täuschen

Was bedeuten solche Ergebnisse für die Unterteilung der Menschen in Rassen? Um es vorwegzunehmen: Manchmal korrespondieren äußerliche Merkmale tatsächlich mit der Gruppenzuordnung nach einer größeren Anzahl genetischer Kriterien – allerdings oft auch nicht! Hautfarbe oder Physiognomie können mitunter, trotz größerer genetischer Verschiedenheit, durch ähnliche Selektionskräfte der Umwelt geprägt sein. Der dunkle Teint der Afrikaner und der australischen Ureinwohner etwa ist in beiden Fällen eine Anpassung an die starke Sonneneinstrahlung in Äquatornähe.

Umgekehrt wirken manchmal genetisch ähnliche Gruppen äußerlich recht verschieden, einfach weil sie völlig unterschiedlichen Selektionskräften ausgesetzt waren. Man denke nur an Nord- und Südeuropäer. Äußere Merkmale, die besonders stark der natürlichen Selektion unterliegen – wie die Hautfarbe –, eignen sich oft schlecht, um eine Gruppenzugehörigkeit genetisch zu untermauern. Mit selektionsneutralen Polymorphismen wie den in diesem Artikel erwähnten gelingt eine Untergliederung meist zuverlässiger. Deren Muster spiegeln die Geschichte von Bevölkerungen in der Regel viel besser.

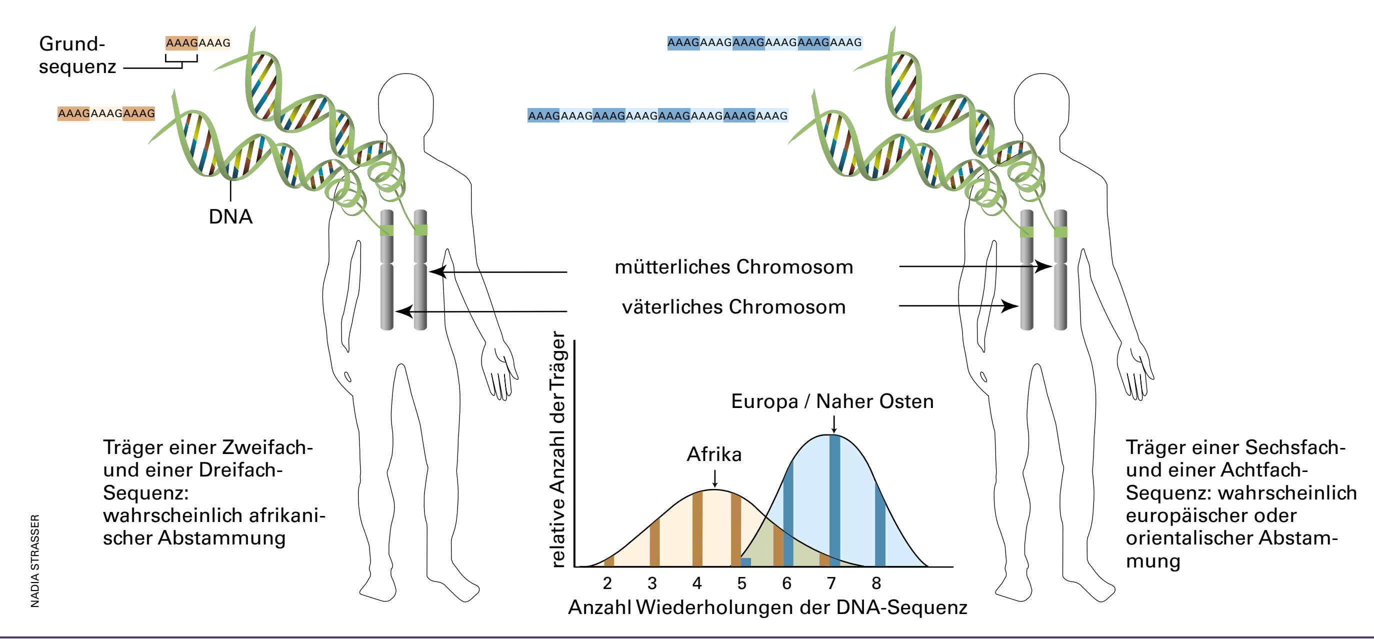
Die USA sind ein gutes Beispiel dafür, wie schwierig es sein kann, eine Bevölkerung nach der geografischen Herkunft zu sortieren. Viele heutige so genannte Afroamerikaner haben relativ nahe Vorfahren aus Westafrika. Die Westafrikaner wiederum sind anhand der Häufigkeiten von genetischen Varianten gut von Europäern, Asiaten wie auch Indianern unterscheidbar. Nicht so die Afroamerikaner: Wie viel jemand aus dieser Personengruppe genetisch mit Westafrikanern gemeinsam hat, schwankt beträchtlich. Viele dieser Menschen haben auch Vorfahren aus anderen afrikanischen Gebieten und aus anderen Weltregionen.

Aufhellung in Amerika

In den vergangenen Jahren ermittelten Wissenschaftler der Staatsuniversität von Pennsylvania in University Park und der Howard-Universität in Washington, D.C., mit einem definierten Satz von Polymorphismen, dass im Durchschnitt nur noch 80 Prozent der Gene von Afroamerikanern aus Westafrika stammen. Bei einigen dieser »Schwarzen« beträgt der Anteil tatsächlich 100 Prozent, bei anderen lediglich 20 Prozent. Was die »weißen« US-Bürger betrifft, die glauben, ihre Vorfahren seien sämtlich Europäer gewesen, so enthüllte die Studie, dass fast jeder dritte von ihnen zu weniger als 90 Prozent europäischer Abstammung ist, also ein beachtlicher genetischer Anteil eine andere Herkunft hat.

Ahnenforschung für Bevölkerungsgruppen

Zu den genetischen Polymorphismen, in denen sich Menschen unterscheiden, gehören wiederholte kurze Sequenzen derselben DNA-Bausteine, die *»short tandem repeats«*. Die Zahl der Wiederholungen der hier verglichenen Sequenz AAAG (nach den Anfangsbuchstaben der Namen dieser Bausteine) streut bei Afrikanern zwischen zwei- und siebenmal, bei Europäern und Orientalen zwischen fünf- und achtmal. Zudem treten die einzelnen Formen verschieden oft auf (siehe untere Grafik). Jemand, der auf den zusammengehörigen Chromosomen eine Zwei- und eine Dreifach-Sequenz trägt (Beispiel im Bild), dürfte afrikanischer Abstammung sein, wer eine Sechs- und eine Achtfach-Sequenz aufweist, hat mit höherer Wahrscheinlichkeit Vorfahren aus Europa oder dem Nahen Osten – obwohl die Zuordnung im überlappenden Bereich nicht eindeutig ist.



Manche Unterschiede der genetischen Ausstattung von Populationen, so auch manche geografisch ungleich verbreiteten Krankheiten, haben ihren Ursprung in Umweltanpassungen. Zum Beispiel können einige polymorphe Gene, deren Verteilung regional schwankt, zwar Krankheiten wie Sichelzellanämie oder Mukoviszidose verursachen – sofern man das gleiche Gen von beiden Eltern erbt. Jedoch bietet die genetische Anlage – wenn man das Gen nur einmal besitzt – im einen Fall eine gewisse Resistenz gegen Malaria, im anderen schützt sie wahrscheinlich etwas davor, bei einer Cholerainfektion zu viel Flüssigkeit zu verlieren. Tatsächlich treten die Mutanten hauptsächlich in Regionen auf, in denen diese Krankheiten zumindest früher oft vorkamen.

Selbst bei Aids spielen Polymorphismen eine Rolle. Manche Menschen, vor allem in Nordosteuropa, sind offenbar resistent gegen eine Infektion mit HIV. In Europa besteht ein Nord-Süd-Gefälle. Und zwar nutzen die meisten Stämme des Virus HIV-1, wenn sie Lymphzellen befallen, einen bestimmten Rezeptor auf Zelloberflächen (den Chemokinrezeptor 5 oder CCR5). Die Betreffenden besitzen diesen Rezeptor nicht, weil bei ihnen in beiden Versionen des betreffenden Gens ein winziges Stück DNA fehlt und die entstehenden fehlerhaften Moleküle dadurch nicht an die Zelloberfläche gelangen. Nach einer neuen Studie könnte das ein Erbe der Pestepidemien sein.

Komplexes Zusammenspiel von Polymorphismen

Andere Varianten dieses Gens haben Auswirkung darauf, wie schnell Aids ausbricht und die Erkrankung fortschreitet. Manche dieser Genvarianten beeinflussen den Fortgang immer auf gleiche Weise, egal welcher Population der Betreffende angehört. Es gibt aber auch Varianten, die den Zeitverlauf nur bei Angehörigen bestimmter Populationen in gleicher Richtung modifizieren. Beispielsweise wirkt eine Form bei Euroamerikanern teils verzögernd, während die gleiche Form den Verlauf bei Afroamerikanern eher beschleunigt.

Auch bei gleicher Gruppenzugehörigkeit finden Mediziner immer mehr Beispiele für Varianten von Polymorphismen, die einen relativ starken Einfluss auf Erkrankungen und deren Verlauf nehmen. Sollte man alle Menschen auf solche Merkmale hin durchmustern? Zurzeit wäre das noch eine recht teure Angelegenheit. Wichtiger erscheinen aber ethische Einwände, wie der Schutz vor dem unberechtigten Zugriff auf solche Daten und das Recht auf Nichtwissen. Zu wissen, dass man ein erhöhtes Risiko für eine Erkrankung trägt, kann sehr belastend sein.

Kompliziert wird es, wenn sich eine Anzahl an Varianten von unterschiedlichen Polymorphismen zu einer Disposition sozusagen aufaddiert. Eine Neigung zu Volkskrankheiten wie Bluthochdruck oder Diabetes hängt in der Regel mit mehreren genetischen Veranlagungen gleichzeitig zusammen. Jedes dieser Gene für sich trägt nur geringfügig zum Erkrankungsrisiko bei. Auch hier scheinen sich manche Varianten je nach Gruppenzugehörigkeit des Betreffenden verschieden auszuwirken. Entscheidend können dabei auch noch kulturelle und soziale Faktoren mitwirken. In Fällen dieser Art dürfte es oft besonders schwierig und aufwändig sein, die am besten geeignete Therapie zu finden. Die ethnische Abstammung oder Eingliederung des Patienten könnte dem Arzt immerhin eine erste Orientierungshilfe bieten.

Die Vereinigten Staaten erleben in diesen Jahren heftige Diskussionen darüber, ob klinische Studien die Rassenzugehörigkeit grundsätzlich pauschal berücksichtigen sollten. Eine entsprechende staatliche Richtlinie liegt bereits vor. Die Kritiker dieses Standpunkts halten die Vorgehensweise für überflüssig und gefährlich. Sie verweisen auf die ohnehin geringfügigen Unterschiede zwischen den ethnischen Gruppen, aber auch auf die große Missbrauchsgefahr für solche Daten. Besser sollte man jeden Teilnehmer individuell genetisch untersuchen. Die Befürworter argumentieren: Wie sich Anlage und Umwelt auf Krankheiten auswirkten, ließe sich nur ergründen, wenn man die Gruppenzugehörigkeit einbeziehe und dabei auch die übliche Rassenzuordnung berücksichtige.

Das Thema geriet in den USA in die Schlagzeilen, als Studien Ergebnisse zu einer rassenspezifischen Wirkung einiger Herz-Kreislauf-Medikamente präsentierten. Demnach erweist sich eine Kombination gefäßerweiternder Substanzen bei manchen herzschwachen Patienten afrikanischer Herkunft als besonders wirksam, während bestimmte Enzymhemmstoffe (so genannte ACE-Hemmer) bei den Betreffenden kaum Effekte zeigten. Zu der Interpretation verlauteten inzwischen kritische Stimmen: Nur ein kleiner Anteil der amerikanischen Schwarzen könne auf Grund seiner genetischen Ausstattung in der Weise profitieren; die Mehrzahl reagiere ähnlich wie Weiße. Sich bei der Medikamentierung einfach nach der Rassenzugehörigkeit zu richten, würde vielen Patienten nicht gerecht. Andere Mediziner plädieren gerade beim Umgang mit den Volkskrankheiten dafür, auch nach der Ethnie zu fragen. So sei nachgewiesen, dass beim Altersdiabetes die Komplikationsrate auch mit der Rassenzugehörigkeit variiere, und zwar unabhängig vom Bildungsniveau und Einkommen.

Einerseits machen wissenschaftliche Aspekte diesen Disput so heftig. In vie- ▷

▲ Menschen unterscheiden sich einer neuen Studie zufolge nur graduell. Die junge Frau (oben) lebt in Tunesien, die ältere Asiatin (unten) gehört zu einer kasachischen Minderheit in Nordostchina.

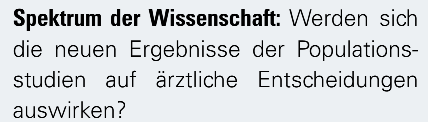
INTERVIEW

Das Genom ist nur die eine Seite

Wenn es darum geht, Patienten auf Medikamente einzustellen, hält Ekkehard Haen akribische genetische Daten für nachrangig.



EKKEHARD HAEN



Spektrum der Wissenschaft: Werden sich die neuen Ergebnisse der Populationsstudien auf ärztliche Entscheidungen auswirken?

Ekkehard Haen: Meiner Meinung nach bewerten einige Forscher die neuen genetischen Erkenntnisse in dieser Hinsicht zu euphorisch. Was daran medizinisch relevant ist, ist ja zum Teil seit vielen Jahren bekannt. So wissen wir schon eine Menge über die individuelle Reaktion auf Medikamente. Eine andere Sache ist, dass dieses Wissen in der Praxis noch nicht genügend umgesetzt wird. Zum Teil erzeugt es leider nur dumpfe Ängste, Fehler zu machen.

Spektrum: Müssen Ärzte in Zukunft zuerst einen genetischen Test machen, bevor sie ein Rezept schreiben?

Haen: Auf gar keinen Fall! Man darf diese Entwicklung nicht überbewerten. Sicher, es gibt schon erste Genchips für solche Zwecke. Aber abgesehen von dem immensen Aufwand – beweisend sind solche Tests letztlich nicht. Sie weisen einerseits noch immer eine hohe Fehlerrate auf. Entscheidend ist andererseits die wirklich beobachtete Reaktion des einzelnen Patienten auf das Medikament, die außer von den Genen auch noch von Umweltfaktoren abhängt, angefangen bei ganz normalen Nahrungsmitteln bis hin zum Rauchen, Kaffeetrinken oder weiteren Arzneimitteln. Das individuelle Genom ist nur eine Seite.

Spektrum: Was ist von genetischer Seite her bei der Dosierung von Medikamenten zu berücksichtigen?

Haen: Das betrifft hauptsächlich zwei Felder. Genetisch kodiert sind einerseits die Rezeptoren, über die Medikamente wirken, also spezifische molekulare Erkennungsstrukturen. Vereinfacht gesagt haben manche Menschen mehr, andere weniger an bestimmten Rezeptoren. Schon aus diesem Grund wirkt das betreffende Medikament bei einigen stärker, bei anderen schwächer.

Zweitens: Große Unterschiede beobachtet man auf den vielen Stufen der Entgiftung und Ausscheidung, wir sagen Verstoffwechselung, der körperfremden Substanzen. Diese Vorgänge beeinflussen, wie lange ein Medikament im Organismus wirksam bleibt, und das kann individuell hochgradig verschieden sein. Gerade hier erkennen wir aber neben dem genetischen Einfluss auch die Bedeutung von Außenfaktoren. Beweisend sind hierfür letztlich nur Wirkstoffkonzentrationsbestimmungen im Blut, wie sie in unserer Klinik bei den psychiatrischen Patienten durchgeführt werden. Nur so erkennt man, ob die erreichte Wirkstoffkonzentration zu hoch oder zu niedrig ist.

Spektrum: Wie werden Medikamente entsorgt?

Haen: Nehmen wir von den vielen Fassetten nur die Entgiftung in der Leber. Generell sucht sich der Organismus aller Fremdstoffe, die er nicht braucht, zu entledigen. Das gilt für überschüssige Nährstoffe ebenso wie für Medikamente. Hierfür sorgen spezielle Enzyme. Vor zwanzig Jahren wurde das Cytochrom P450 entdeckt. Genau genommen handelt es sich dabei um eine große Enzymfamilie mit über 50 heute bekannten Isoformen. Zwölf dieser Isoenzyme sind für den Arzneimittelstoffwechsel relevant.

Professor Dr. Dr. Ekkehard Haen leitet die Klinische Pharmakologie/Psychopharmakologie der Psychiatrischen Universitätsklinik Regensburg. Er ist promovierter Mediziner und Biochemiker, zudem Facharzt für Pharmakologie und Toxikologie sowie für Klinische Pharmakologie.

Jedes Medikament wird spezifisch über eines oder mehrere von ihnen abgebaut. Die genetische Ausstattung mit diesen Isoenzymen kann individuell verschieden sein. Jemand, dem ein bestimmtes Enzym fehlt, reagiert dann sehr empfindlich auf ein Medikament, das sonst diesen Abbauweg gehen würde, sich nun aber anreichert. Andere Personen, bei denen das Isoenzym übermäßig vorkommt, etwa weil das zugehörige Gen gleich mehrfach vorhanden ist, bauen das Medikament umso schneller ab.

Spektrum: Gibt es regionale Unterschiede in der Ausstattung mit diesen Isoenzymen?

Haen: Ja, aber wie bei allen solchen genetischen Unterschieden gilt das immer nur prozentual. Zwei Beispiele: Das Isoenzym 2D6 vom Cytochrom P450 besitzen anscheinend 5 bis 10 Prozent der Europäer überhaupt nicht. Medikamente, die sonst über diesen Weg verstoffwechselt würden, werden nur sehr verzögert – über Ausweichrouten – umgesetzt. Wir sprechen bei den Betroffenen von langsamen Metabolisierern. Das Medikament bleibt also besonders lange im Körper aktiv. Es gibt Anzeichen für einen Nord-Süd-Gradienten: In Schweden

scheint nur 1 Prozent betroffen, in Deutschland 2, in Spanien 12 Prozent der Bevölkerung. In der Türkei sind es 6, in Äthiopien 29 Prozent. Das andere Extrem: 2 bis 3 Prozent der Europäer bilden dieses Isoenzym im Übermaß, offenbar weil das zugehörige Gen in mehreren Kopien vorkommt. Sie setzen manche Medikamente viel zu schnell um.

Ein anderes Beispiel ist das Isoenzym 2C19. Das haben 2 bis 5 Prozent der Europäer gar nicht, und bei den Ostasiaten fehlt es 15 bis 23 Prozent.

Spektrum: Welche Bedeutung haben nun die Umweltfaktoren?

Haen: Ich deutete schon an, dass auch Umweltfaktoren die Medikamentenverstoffwechselung verstärken oder abschwächen können. Wie sich jemand ernährt, ob er raucht, Kaffee trinkt oder noch andere Medikamente nimmt, führt zu demselben Phänomen: Es wird eine völlig andere Dosierung erforderlich. Grapefruitsaft etwa blockiert diese Enzyme – was denselben Effekt hat, als wäre das Enzym genetisch zu wenig kodiert. Dann braucht man niedrigere Dosen der Arznei.

Spektrum: Wie wirkt sich Nikotin aus?

Haen: Zigarettenrauch stimuliert ein anderes Cytochrom P450, nämlich das Isoenzym 1A2. Man baut dann manche Wirkstoffe schneller ab. Eindrucksvoll ist der Effekt auf das Neuroleptikum Clozapin, das Schizophreniepatienten erhalten und das zugleich müde macht. Ein Arzt unserer Klinik erzählte mir, die Patienten würden rasch merken, dass sie durch Rauchen munterer werden. Nur ist ihnen nicht klar, dass sie nun nur die Hälfte oder weniger der nötigen Wirkstoffkonzentration im Körper haben. Mit Hilfe von Blutmessungen wird die Dosierung dann angepasst, in dem Fall also erhöht. Es ist derselbe Effekt wie bei Nichtrauchern, die aus genetischen Gründen zu viel von dem Enzym bilden.

Bei Rauchern muss man sehr aufpassen, wenn der Patient plötzlich weniger raucht, etwa weil er sich eine Erkältung zugezogen hat. Dadurch geht dann auch diese Enzymaktivierung wieder zurück, die Clozapinkonzentration steigt an.

Spektrum: Sie erwähnten auch Wechselwirkungen zwischen Medikamenten. Sind die Leberenzyme auch da beteiligt?

Haen: Ja, der Körper macht keinen Unterschied zwischen Nahrungs-, Genuss- und Arzneimitteln. Zum Beispiel: Manche Antibiotika, etwa Erythromycin, blockieren wie Grapefruitsaft den Abbau vieler Medikamente. Gleiches gilt für Metoprolol, einen Betablocker. Das Antiepileptikum Carbamazepin stimuliert wie Rauchen das Cytochrom-Enzymsystem. Das mag erschreckend klingen, es besteht aber kein Grund zur Hysterie. Patienten wie Ärzte sollten wissen, dass diese Wechselwirkungen etwas ganz Normales sind und sich gut beherrschen lassen, wenn man sie nur kennt und in die Therapie mit einbezieht.

Spektrum: Für die Ärzte bedeutet das allerdings mehr Aufwand.

Haen: Nicht unbedingt. Sie müssen den Patienten wie üblich sorgfältig beobachten, die nötigen Medikamente individuell einstellen. Gegebenenfalls können sie Wirkstoffkonzentrationsmessungen vornehmen lassen, wenn jemand ein Medikament in der üblichen Verschreibung offenbar schlecht verträgt, oder wenn es umgekehrt nicht wirkt. Es sollte lediglich mehr darauf geachtet werden, die so gesammelten Erfahrungen in Patientenpässen zu dokumentieren, damit nachbehandelnde Ärzte über ungewöhnliche Reaktionen auf Arzneimittel informiert sind.

Keiner muss alles wissen! Zu den angesprochenen Fragen kann man sich bei klinischen Pharmakologen Rat holen. In Bayern zum Beispiel bauen wir gerade einen Informationsdienst auf (www.amuep-agate.de). Das Internet bietet weitere Adressen.

Keinesfalls sollte man angesichts der Fülle an neuen Erkenntnissen resignieren. Die Sache lässt sich beherrschen, wenn man neben der genetischen Veranlagung auch die Umwelt berücksichtigt. Richtungsweisend ist dabei für mich die Einstellung einiger sehr erfahrener Kliniker in meinem Umfeld. Sie betonen immer wieder: »Wir müssen verhindern, dass wir Laborwerte behandeln. Wir müssen dabei bleiben, den Patienten zu therapieren.«

Interview: ***Adelheid Stahnke,*** *Spektrum der Wissenschaft*

▷ len biomedizinischen Studien erfolgte die Rassenzuordnung bisher allein nach oberflächlichen, äußerlichen Kriterien. Andererseits zeigt die Kontroverse, wie stark die Wahrnehmung des Themas gerade in den USA vom sozialen Hintergrund und der politischen Anschauung geprägt ist.

Man sollte es im medizinischen Zusammenhang nicht grundsätzlich ablehnen, auch nach der Abstammung und ethnischen Gruppe zu fragen. Diese Information kann in Fällen nützlich sein, für die belegt ist, dass bei einer bestimmten geografischen Herkunft oder kulturellen Zugehörigkeit häufiger bestimmte gesundheitsrelevante genetische Dispositionen vorhanden sind. Genauso können sich – unabhängig von den Genen – die Kultur oder die Lebensbedingungen in einer Region auf manche Krankheitsanfälligkeit auswirken.

Um die medizinische Forschung auf diesem Gebiet voranzubringen, kann man auf eine Zuordnung zu gesonderten Bevölkerungsgruppen nicht verzichten. Doch auch fern von ihrer klinischen Relevanz haben die genetischen Studien über menschliche Populationen vieles an den Tag gebracht, das uns alle angeht. Menschen, die ganz verschieden aussehen mögen, können sich genetisch in manchem recht nahe stehen. Andere verbergen unter derselben Hautfarbe eine ganz unterschiedliche Natur. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Michael J. Bamshad (links) ist Genetiker an der medizinischen Fakultät der Universität von Utah in Salt Lake City. Seine populationsgenetischen Studien sollen die Stammesgeschichte des Menschen und die Entstehung von Krankheiten erhellen. **Steve E. Olson** lebt als Publizist in der Nähe von Washington D.C.

Genetics for the human race. Nature Genetics (Sonderband), Nov. 2004

Nature insight: Human genomics and medicine in: Nature, Bd. 429, S. 439, 27. Mai 2004

Mapping human history: Genes, race, and our common origins. Von Steve Olson. Mariner Books, 2003

Human population genetic structure and inference of group membership. Von Michael J. Bamshad et al. in: American Journal of Human Genetics, Bd. 72, Heft 3, S. 578, März 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN

PALÄONTOLOGIE

Douglas Palmer

Die Geschichte des Lebens auf der Erde

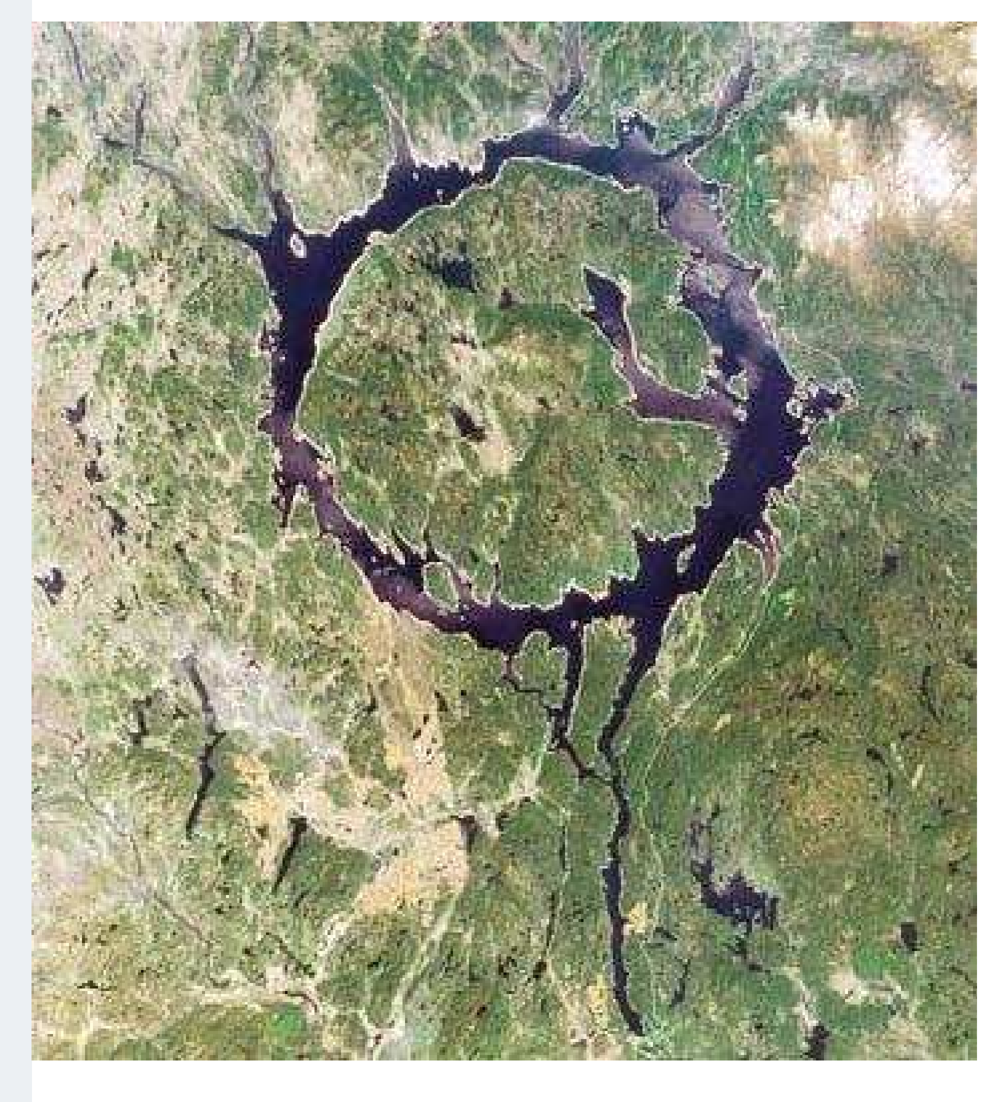
Vier Milliarden Jahre

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
Primus, Darmstadt 2004. 176 Seiten, € 29,90

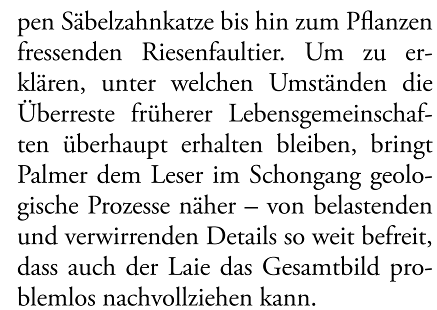


Douglas Palmer entführt den Leser auf eine detektivische Reise in die belebte Vergangenheit unseres Planeten. Mitreißend und anschaulich erzählt er, wie Forscher sich akribisch zu den heutigen Erkenntnissen vorgetastet haben – passionierte Wissenschaftler, die eine sichere Stelle aufgaben, um irgendwo in Asien nach Menschenknochen zu suchen, oder geologische Schichten mit solchem Aufwand kartierten, dass es sie in den Ruin trieb. Und der Fortschritt war rapide: Immerhin haben die Leute noch vor 200 Jahren die Geschichte von der Sintflut wörtlich genommen.

Diesen spannenden Weg der Forschung vollzieht Palmer, Dozent am Institute for Continuing Education in Cambridge, überzeugend nach, indem er bedeutende Fundstellen von Fossilien präsentiert. In Kalifornien entpuppten sich die Teergruben von La Brea als wahre Sammelstätten für prähistorische Tiere. Insgesamt fanden sich dort eineinhalb Millionen Knochen, von der plumpen Säbelzahnkatze bis hin zum Pflanzen fressenden Riesenfaultier. Um zu erklären, unter welchen Umständen die Überreste früherer Lebensgemeinschaften überhaupt erhalten bleiben, bringt Palmer dem Leser im Schongang geologische Prozesse näher – von belastenden und verwirrenden Details so weit befreit, dass auch der Laie das Gesamtbild problemlos nachvollziehen kann.



Der Einschlagkrater von Manicougan (Kanada) mit seinen 70 Kilometern Durchmesser wurde durch Gletschererosion in den Eiszeiten des Quartärs eingeebnet. Die verbliebene ringförmige Vertiefung füllte sich mit Schmelzwasser.



Die Reise geht rückwärts: Beginnend mit der Geschichte des Menschen, bewegt sich Palmer immer weiter in die Vergangenheit, durch die Zeit der Saurier bis hin zum Ursprung des Lebens und zu den Anfängen der Erde. Zeitbalken sorgen für den nötigen Überblick, und aufs Neue wird klar, wie vergleichsweise jung der Mensch ist. Doch selbst innerhalb dieses geologisch kurzen Zeitraums hat er eine beachtliche Entwicklung durchgemacht. »Das Bild, wonach wir in gerader Linie von einem affenähnlichen Vorfahren abstammen, … lässt sich nicht mehr aufrechterhalten. In Wirklichkeit ist es viel interessanter und komplizierter.« Neandertaler, *Australopithecus* und *Homo erectus* erstehen vor dem inneren Auge wieder auf, und der Begriffswirrwarr sortiert sich.

Zuletzt wagt Palmer noch einen Sprung in die Zukunft: Wird die klassische Welt Griechenlands und Italiens tatsächlich zu den neu entstehenden Südalpen zusammengeschoben »wie ein Auto in der Schrottpresse«? Wird der »große Teich« zwischen Amerika und der Alten Welt immer größer? Fragen, die niemand mit Sicherheit beantworten kann. Der nunmehr besser informierte Leser kann immerhin Beruhigung darin finden, dass geologische Uhren langsam ticken. Dagegen könnten Klimaveränderungen in der Vergangenheit äußerst schnell verlaufen sein (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 42). »Wenn das stimmt, könnten wir – oder unsere Nachkommen – eines Tages in große Schwierigkeiten geraten.«

Beim Lesen des Buchs entsteht nicht nur Respekt vor den Wissenschaftlern, sondern auch vor dem Autor, der aus einer unüberschaubaren Fülle an Fakten ein Buch zusammengestellt hat, das sich in weiten Strecken liest wie ein spannender Kriminalroman. Der Experte allerdings wird auf Aha-Erlebnisse vergeblich warten.

Katharina Grund

Die Rezensentin ist Diplomgeografin und freie Wissenschaftsjournalistin in München.

ÖKOLOGIE

Josef H. Reichholf

Der Tanz um das goldene Kalb

Der Ökokolonialismus Europas

Wagenbach, Berlin 2004. 217 Seiten, € 19,50



Gegenwärtig werden in Deutschland etwa 15,7 Millionen Rinder, 23,7 Millionen Schweine, 2,5 Millionen Schafe und 600 000 Pferde gehalten. Das sind 250 große Säugetiere auf jedem Quadratkilometer landwirtschaftlich genutzter Fläche – und damit mehr als zweieinhalbmal so viel wie in der Serengeti, der an Wildtieren reichsten Region der Erde. Aber anders als der weit gehend menschenleere Nationalpark im Herzen Afrikas wird Deutschland außerdem von 82 Millionen Menschen bevölkert. Damit hat jeder Quadratkilometer Deutschlands eine Biomasse von 90 Tonnen zu tragen – eine ungeheure Zahl, verglichen mit den 20 Tonnen der Serengeti.

Schon diese einfache Rechnung, behauptet der Münchner Zoologe und Ökologe Josef Reichholf, ist Beweis genug, dass die Viehbestände in Deutschland viel größer sind, als seine Böden ernähren und verkraften können. Und das hat verheerende Auswirkungen auf den Naturhaushalt.

Bereits vor einiger Zeit hat Reichholf eine Entdeckung gemacht, die mit den idyllischen Vorstellungen vieler Naturschützer schlecht zu vereinbaren ist: Die weitaus meisten Tier- und Pflanzenarten gibt es gegenwärtig in Deutschlands Großstädten, die wenigsten auf seinen Äckern und Weiden. Mitten in Berlin sind heute mindestens 140 verschiedene Brutvogelarten zu finden, darunter die seltenen Seeadler, Wanderfalken, Uhus und Nachtigallen, und mehr Haubenlerchen als in ganz Bayern. In der Hauptstadt haben sich etwa fünfzig frei lebende Säugetierarten angesiedelt – ein Großteil der in Deutschland überhaupt vorkommenden Spezies. Während in München nicht weniger als 350 nachtaktive Schmetterlingsarten leben, sind es auf dem freien Ackerland nur noch 15 bis 20. Allein in der Innenstadt von Nürnberg gibt es rund 1100 wild wachsende Pflanzenarten; in seinem Umland, das dicht bewaldet und wenig bebaut ist, sind es nur noch halb so viele.

Dass die Städte mittlerweile zu Oasen der Artenvielfalt geworden sind, lässt sich nach Reichholf leicht erklären: Dort blieben winzige Reste solcher Lebensräume erhalten, die anderswo längst vernichtet wurden; die Tiere sind vor der Verfolgung durch die Jäger relativ sicher; und die hochgradige Bodenversiegelung bewahrt die Städte davor, von Düngemitteln überschwemmt zu werden.

Denn dass in Deutschland und Mitteleuropa die Artenvielfalt stetig abnimmt und immer mehr Biotope verschwinden, hat laut Reichholf nicht etwa die Großindustrie, sondern in erster Linie die Landwirtschaft zu verantworten. Sie beseitigt oder vereinheitlicht nicht nur sämtliche Landschaftsformen, die ihr bei der Steigerung der Produktion im Weg stehen, und setzt rücksichtslos Herbizide, Pestizide und Fungizide ein. Noch gravierender sind die Schäden, die sie mit ihrem exzessiven Düngemitteleinsatz anrichtet.

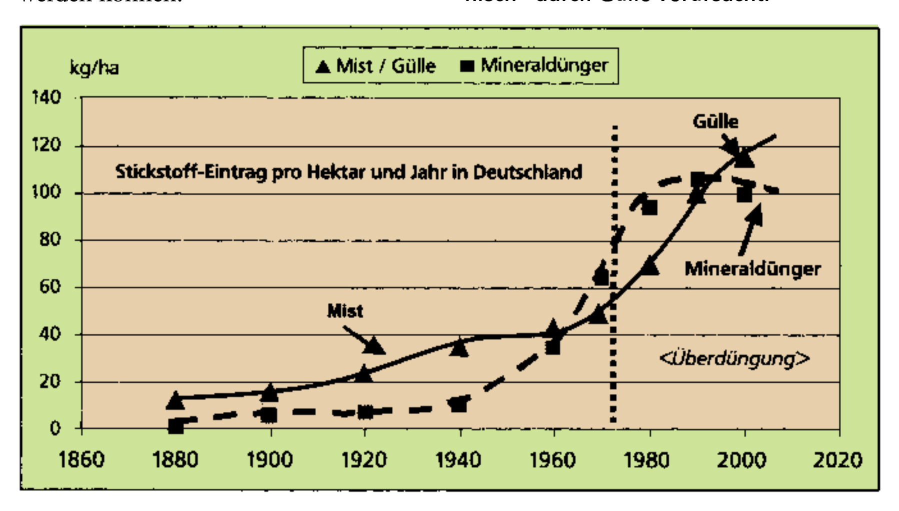
Deutschland ertrinkt in Gülle

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelangten im Durchschnitt 30 bis 50 Kilogramm Stickstoff pro Jahr auf jeden Hektar der deutschen Fluren. Etwa die gleiche Menge wird heute allein von den Kraftfahrzeugen und Heizkraftwerken freigesetzt, und sie belastet in hohem Maß die Wälder, Trocken- und Magerrasen, Moore, Seen und Naturschutzgebiete. Zusätzlich produziert inzwischen das Millionenheer der Schweine und Rinder derart viel Gülle, dass Berge von Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumdünger anfallen, die nicht mehr abgebaut werden können.

Diese extreme Überdüngung, die inzwischen den Großteil der Böden und Gewässer erfasst hat, zieht tief greifende Veränderungen nach sich. So können sich einige wenige Pflanzenarten wie der Riesenbärenklau, der Riesenknöterich und das Drüsige Springkraut, die eine Vorliebe für nährstoffreiche Böden haben, auf Kosten der meisten anderen massenhaft vermehren, und das hat wiederum weit reichende Auswirkungen auf die Nahrungsgrundlage etlicher Tierarten.

Reichholf macht in diesem Zusammenhang auf ein paradox anmutendes Phänomen aufmerksam: Dank immer aufwändigerer Kläranlagen gelangen kaum noch menschliche Abwässer, industrielle Gifte und Schadstoffe in die deutschen Bäche, Flüsse und Seen. Trotzdem gehen die Fischbestände kontinuierlich zurück. Auch hieran, erklärt Reichholf, ist die Landwirtschaft nicht unschuldig. Denn die Abwässer aus der Massenviehhaltung, die ungefiltert in die Bäche und Flüsse eindringen, enthalten im Übermaß Substanzen, welche die Algen gedeihen lassen, aber nur klägliche Reste der organischen Bestandteile, von denen sich die Fische, Muscheln und Krebse ernähren. Diese organischen Bestandteile lieferten früher die menschlichen Abwässer, noch früher hauptsächlich die Auwälder. Aber auch die sind der Landwirtschaft zum Opfer gefallen. ▷

Die Überdüngung Deutschlands (mehr als 100 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr im Durchschnitt) wird neuerdings zum größeren Teil nicht durch Kunstdünger, sondern »ganz organisch« durch Gülle verursacht.



▷ Das gegenwärtige massenhafte Aussterben der Arten findet zwar nicht in Europa statt, wird aber indirekt von Europa verursacht: Die Regenwälder Amazoniens und Südostasiens werden gerodet, um Platz für Rinderfarmen und für den Anbau der Futtermittel zu schaffen, auf welche die europäische Landwirtschaft dringend angewiesen ist. Da die tropischen Regenwälder hochempfindliche Ökosysteme sind, kann schon die Abholzung weniger Hektar eine Art, die gerade dort ihre ökologische Nische gefunden hat, vollständig ausrotten.

Reichholf schreibt außerdem über die Ursprünge und die Geschichte der Rinderkultur, und er mutmaßt, dass die Rinderzucht den Anstoß zur Erfindung der Sklaverei, des Patriarchalismus, der Polygamie und des Harems gegeben haben könnte. Das sind anregende, aber waghalsige Spekulationen.

Doch ansonsten werden Reichholfs ketzerische Thesen durch eine Fülle empirischer Befunde gestützt. Ein herausragender Beitrag zur politischen Ökologie.

Frank Ufen

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.



LITERATUR

Henning Genz und Ernst Peter Fischer

Was Professor Kuckuck noch nicht wußte

Naturwissenschaftliches in den Romanen Thomas Manns, ausgewählt, kommentiert und auf den neuesten Stand gebracht

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2004. 318 Seiten, € 9,90

Ein »verkommener Gymnasiast« sei er gewesen, sagte Thomas Mann einst über sich selbst. »Faul und verstockt und voll liederlichen Hohns« habe er seine Schulzeit abgesessen. Dennoch schien die Wissenschaft den berühmten deutschen Dichter durchaus umzutreiben: Immer wieder machte er in seinem literarischen Werk die Erkenntnisse und Fragen der Biologen, Physiker, Kosmologen, Mathematiker und Mediziner seiner Zeit zum Thema.

Henning Genz, pensionierter Professor für theoretische Physik an der Universität Karlsruhe, und der Biologe, Physiker und Wissenschaftshistoriker Ernst Peter Fischer haben es sich nun zur Aufgabe gemacht, Manns Exkurse in die Welt der Forschenden aus »Zauberberg«, »Buddenbrooks« und anderen Werken aufzuarbeiten: Was war der damalige Stand der Forschung? Welcher Quellen hat sich Mann wohl bedient? An welchen Aspekten der Naturwissenschaft war er interessiert? Und vor allem: Können seine Ausführungen auch heute noch bestehen?



Sternäugig ist Thomas Mann auf diesem Porträt von Max Oppenheimer (1913) dargestellt.

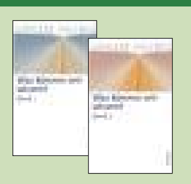
Erfreulicherweise zitieren die beiden Autoren recht ausführlich die besprochenen Ausschnitte aus Manns Werken. So kommt der literarische Aspekt neben all den Fakten nicht zu kurz. Zudem runden zahlreiche Fotografien, Zeichnungen und Cartoons die Erläuterungen ab und sprechen das Auge an.

Doch die Sache hat auch einen Haken: Fischer und Genz jagen ihre Leser streckenweise kreuz und quer durch die Welt der Wissenschaft – vom Luftdruck zu den Schmetterlingen, weiter zur Interferenz von Wellen, um sich wenig später der Quadratur des Kreises zu widmen. Die Menge an Details lässt ein bisschen den roten Faden vermissen, an den sich der Literaturfreund halten könnte, und verlangt dem Leser einen recht langen Atem ab. Wer Thomas Manns Werke liebt, sollte den zwar ohnehin mitbringen, wird es aber wahrscheinlich wenig schätzen, sein Idol auf naturwissenschaftlicher Ebene zerpflückt zu sehen.

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Gerhard Vollmer

Was können wir wissen?

Band 1: Die Natur der Erkenntnis

Band 2: Die Erkenntnis der Natur

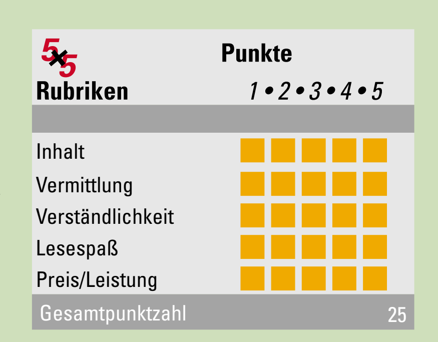
Hirzel, Stuttgart 2003, zusammen 690 Seiten, € 39,–

Dieses Werk kann als ein schon zu Lebzeiten verfasstes Vermächtnis von Gerhard Vollmer gelten.

Die Kapitel sind zumindest teilweise schon früher als eigenständige Abhandlungen erschienen. Doch ergibt sich keinesfalls der Eindruck eines Flickenteppichs; die sorgfältig formulierten und ausgearbeiteten Aufsätze bilden ein harmonisches Ganzes. Der Autor predigt nicht, sondern tritt immer wieder auch als *advocatus diaboli* in eigener Sache auf.

Die Lektüre dieses Buches ist schon deswegen ein intellektuelles Vergnügen, weil es heute nur noch wenige gibt, die mit der Präzision und dem rhetorischen Schliff eines Gerhard Vollmer ihre Gedanken in Worte fassen können.

Aus der Rezension von Thomas Lazar



5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	25

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**



CHEMIE

Gabriele und Rolf Froböse

Lust und Liebe – alles nur Chemie?

Wiley-VCH, Weinheim 2004. 231 Seiten, € 24,90

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Napoleon bevorzugte etwas herbere Duftnoten. Auf der Rückkehr von einem Feldzug ließ er seiner Joséphine die Anweisung übermitteln: »Nicht waschen – komme in drei Tagen.«

Wenn ein Chemikerehepaar versucht, die Liebe auf das Zusammenspiel von Molekülen zu reduzieren, ist das schon ein bisschen platt. Das haben sich Gabriele und Rolf Froböse wohl auch gedacht und schicken deshalb in ihrem Buch das junge Studentenpaar Bianca und Michael vor. Er Ingenieur, sie Medizinstudentin. Am Beispiel dieser beiden Turteltauben soll der Leser lernen, welche chemischen Substanzen für Lust und Liebe verantwortlich sind.

Los geht es ganz klassisch mit Hormonen. Abgesehen von den skurrilen historischen Verhütungsmethoden, die an dieser Stelle vorgestellt werden, erfährt man allerdings nichts Interessantes, es sei denn, man hat immer noch nicht richtig verstanden, was sich in der Pubertät im und am menschlichen Körper so alles ausbildet. Auch dass Männer Wechseljahre haben und eine Hormontherapie machen können oder dass beim Marathonlauf Endorphine ausgeschüttet werden, sind keine sensationellen Neuigkeiten.

Von den körpereigenen Drogen kommen die Autoren zu synthetischen Rauschmitteln, doch auch dazu gibt es anscheinend nichts Neues zu sagen. Wer es noch nicht wusste, erfährt, dass Methadon als Ersatzdroge für Heroin eingesetzt wird und dass Letzteres süchtiger macht als Morphin. Aber warum? Wieso macht denn eine Droge abhängiger als die andere? Warum kommt der Organismus mit körpereigenen Drogen zurecht, während die Aufnahme synthetischer Rauschgifte katastrophale Folgen hat?

Als schließlich das viel beschriebene Erscheinen eines hellen Lichts am Ende eines Tunnels bei Nahtoderfahrungen erwähnt wird, hofft der Leser gespannt, aber vergeblich auf eine chemische Erklärung. Welche Substanzen bewirken das finale Schauspiel im Gehirn? Wozu könnte es dienen? Die Neugier bleibt unbefriedigt.

Da die Autoren alle Substanzen in einen Topf werfen, die irgendetwas mit Liebe und Leidenschaft zu tun haben, kommt ein seltsamer Cocktail aus Hormonen, Drogen, Parfüm und Schminke zu Stande. Ausgerechnet das Kapitel über den biederen Lippenstift entpuppt sich als das beste des Buchs. Denn dass dieses Kosmetikprodukt 1860 von dem Deutschen Karl Meyer fürs Theater erfunden wurde, wissen sicherlich die wenigsten. Die praktischen Metallhüllen und die Drehmechanik gibt es erst seit dem 20. Jahrhundert; vorher wurde Lippenstift in Seidenpapier eingewickelt. Drei Kilogramm schmiert sich die Durchschnittsfrau im Leben auf den Mund; außerdem gehört der Lippenstift zu den meistgeklauten Konsumgütern.

Und was assoziieren Sie mit Aphrodisiaka? Austern und Kaviar? Richtig – und viel mehr ist auch den Froböses nicht eingefallen. Am Ende verschaffen selbst Pheromone und Viagra dem Leser keinen intellektuellen Höhenflug mehr.

Hier stimmt die Chemie nicht.

Dagny Lüdemann

Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.



PHILOSOPHIE

Robin Le Poidevin

Wie die Schildkröte Achilles besiegte

oder Die Rätsel von Raum und Zeit

Aus dem Englischen von Michael Schmidt.
Reclam, Leipzig 2004. 364 Seiten, € 24,90

Das Paradox von Achilles und der Schildkröte ist alt – der antike griechische Philosoph Zenon von Elea hat es aufgestellt – und berühmt: Achilles gibt der Schildkröte beim Wettrennen großmütig ein Stadion (eine Längeneinheit) Vorsprung. Aber obgleich er zehnmal so schnell läuft wie sie, wird er sie nie einholen. Denn während Achilles das Stadion durcheilt, kriecht die Schildkröte ein zehntel Stadion, während Achilles diese Entfernung durchläuft, ist sie ein hundertstel Stadion weitergekrochen und so weiter – eine unendliche Summe von Entfernungen, die auch der schnelle Achilles nie wird überwinden können.

Seit einigen hundert Jahren gilt das Paradox als erledigt. Im Mathematikunterricht lernt man spätestens in der 12. Klasse, dass eine Summe aus unendlich vielen Gliedern sehr wohl einen endlichen Wert haben kann. Mit dem zuge-

hörigen Handwerkszeug berechnet man auch den Ort, an dem Achilles die Schildkröte erreicht, und befindet sich damit, im Gegensatz zu Zenon, in Übereinstimmung mit der Alltagserfahrung.

Was veranlasst Robin Le Poidevin, Professor für Philosophie an der Universität Leeds (Großbritannien), diese alte Geschichte nochmals aufzuwärmen?

Es ist das Recht des Philosophen, auch etablierte Gedankengänge anderer Wissenschaften zu hinterfragen. »Diese Probleme schlicht als mathematische Rätsel zu behandeln, für deren Lösung nur die Technik der Infinitesimalrechnung erforderlich ist, wird ihrem Reiz und ihrer Bedeutung in philosophischer Hinsicht nicht gerecht« (S. 325). Und in der Tat: Die Mathematiker drücken sich um die Beantwortung gewisser Fragen, indem sie sich, zumindest pro forma, von der Realität abkoppeln. Offiziell sind ihre reellen Zahlen eben nicht real, sondern ziemlich abstrakte Konstruktionen des Geistes. Damit landet der Schwarze Peter bei den Physikern. Die ziehen sich, wenn es hart auf hart kommt, darauf zurück, statt einer Erklärung der Welt ein mathematisches Modell derselben zu liefern. Also bleiben Fragen wie »Gibt es in der Realität beliebig kleine Zeitintervalle?« den Philosophen überlassen.

Der Ärger ist nur: Le Poidevin findet auch keine bessere Antwort. Sein Realitätsbegriff ist nicht derjenige der Physiker (»Was man nicht wenigstens im Prinzip messen kann, darüber soll man schweigen«) noch derjenige der Mathematiker (»Was man widerspruchsfrei definieren kann, das existiert bereits kraft dieser Definition«), er bleibt nebelhaft und daher wenig fruchtbar. Über etliche weitere Probleme, welche die Mathematik im Verein mit der Physik ebenfalls – nach ihrem Verständnis – erledigt hat, weiß Le Poidevin nichts weiter mitzuteilen als eine »Beunruhigung«. Hat er vielleicht im Mathematikunterricht nicht richtig aufgepasst? Er schweigt über einige Resultate der klassischen Analysis, die ihn eigentlich nach seinen eigenen Maßstäben hätten beruhigen müssen.

Neben diesen seltsam anachronistischen Erörterungen gehen einige gehaltvollere Gedanken fast unter. Wie bestimmt man die Genauigkeit einer Uhr? Nur mit einer anderen Uhr, denn es gibt keinen objektiven, von irgendwelchen materiellen Gegenständen unabhängigen Maßstab für das Vergehen der Zeit.

Wer aus diesem logischen Zirkel ausbrechen will, kann allenfalls einen Zeitmesser dann als genau definieren, wenn die mit ihm bestimmten Zeiten zusammen mit den – als weniger problematisch empfundenen – Längenmessungen zu den Newton'schen Bewegungsgesetzen passen. Dann allerdings müsste er von vornherein an diese Gesetze glauben; denn nachprüfen kann man deren Gültigkeit nicht ohne eine Uhr …

Insgesamt ist das Buch geeignet, die übelsten Vorurteile gegen die Philosophie zu bestätigen. Ich glaube, es gibt bessere Philosophen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



MEDIZINGESCHICHTE

Johannes W. Grüntzig, Heinz Mehlhorn

Expeditionen ins Reich der Seuchen

Medizinische Himmelfahrtkommandos der deutschen Kaiser- und Kolonialzeit

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2005. 380 Seiten, € 28,–

Auf dem Titelbild watet ein Weißer hüfttief durch ein tropisches Gewässer, die Pistole vor der Brust hochgeschnallt, während zwei Eingeborene starr in die Kamera schauen. Gleichzeitig schiebt sich von oben bedrohlich der – rasterelektronenmikroskopisch abgebildete und dramatisch kolorierte – Kopf einer Tsetsefliege ins Bild.



Das umreißt treffend das Thema des Buchs. Die Düsseldorfer Professoren Johannes W. Grüntzig und Heinz Mehlhorn – der eine Ophthalmologe, der andere Parasitologe – wollen die Ergebnisse bahnbrechender Forschungsarbeiten über exotische Krankheitserreger beschreiben und sie gleichzeitig in ihren historischen Kontext stellen. Dabei geht es weniger um die – häufig genug referierten – Fakten, sondern um die Menschen und die Ereignisse hinter ihren wissenschaftlichen Pioniertaten.

Bis zur Gründung des neuen Deutschen Reichs im Jahr 1871 konnten nur England und Frankreich auf umfangreichen Kolonialbesitz zurückgreifen. Nachdem man sich in Berlin 1884 entschlossen hatte, dem »imperialistischen Klub« beizutreten, rückte das Reich mit deutscher Gründlichkeit sehr rasch in die vorderste Reihe der Kolonialmächte auf und verfügte innerhalb weniger Jahre über große Gebiete in Afrika, Asien und in der Südsee, die wirtschaftlich genutzt werden sollten. Auf seinem Höhepunkt im Jahr 1913 umfasste der deutsche Kolonialbesitz das heutige Kamerun, Togo, Tansania, Namibia sowie zahlreiche Territorien in Mikronesien und Neuguinea mit einer Fläche von insgesamt drei Millionen Quadratkilometern – mehr als fünfmal die Fläche des Deutschen Reichs.

◀ **Ulzeröse Hauterscheinungen eines Syphilispatienten im tertiären Stadium (links); erblindeter Onchozerkose-(Flussblindheits-)Patient mit weißlich eingetrübten Hornhäuten (sklerosierende Keratitis)**



Bevor der Staat aus seinen Neuerwerbungen Nutzen ziehen konnte, musste er unter erheblichen Kosten Verwaltung, Polizei und Militär, Bildungs- und Gesundheitswesen aufbauen. Denn die Ausbeutung lokaler Ressourcen wurde dadurch behindert, dass es wegen mangelhafter Hygiene und hoher Sterblichkeit in der Bevölkerung an einheimischen Arbeitskräften mangelte. Durch den zunehmenden Güter- und Personenverkehr mit den Überseegebieten wuchs die Gefahr der Einschleppung exotischer Krankheitserreger. Eine medizinische Infrastruktur, die dieser Herausforderung gewachsen war, gab es weder in den Kolonien noch im deutschen Mutterland.

Besonders gravierend war der Mangel an Ärzten mit Kenntnissen über tropische und exotische Krankheiten und die völlige Unkenntnis über deren biologische und epidemiologische Grundlagen. An deutschen Universitäten gab es nicht eine Forschungs- oder Ausbildungsstätte für Tropenmedizin. Es dauerte mehr als ein Jahrzehnt (und eine Choleraepidemie von bislang unbekanntem Ausmaß in Hamburg), bis in der Freien und Hansestadt das erste tropenmedizinische Institut gegründet wurde.

Es fehlte an tropentauglicher Kleidung: Die ersten Tropenhelme waren eine Modifikation der preußischen Pickelhaube. Temperaturunempfindliche Fotoapparate, transportable Labors und andere für Expeditionen geeignete Ausrüstung mussten erst einmal entwickelt werden. Der Forscher, der sich in die neuen Kolonien aufmachte, musste seine gesamte Infrastruktur mitnehmen und sie in hinreichend kleine Einzelteile zerlegen, sodass einheimische Träger sie schleppen konnten.

Mit der ersten Expedition von Robert Koch nach Ägypten auf der Suche nach dem Erreger der Cholera beginnt die Beschreibung der wissenschaftlichen Himmelfahrtkommandos und damit der Hauptteil des Buches. Grüntzig und Mehlhorn berichten detailgetreu über die



Werbeanzeige in der »Deutschen Kolonialzeitung« von 1914

Entdeckung des Pestbazillus in Indien, die Identifizierung von Malariaerregern in Java, einen ersten Fall von Creuzfeldt-Jakob-Erkrankung bei den Papuas in Kaiser-Wilhelm-Land (heute Papua-Neuguinea), die legendäre Erforschung der Schlafkrankheit durch Robert Koch in Ostafrika, die erste Beschreibung von humanpathogenen Fadenwürmern in der Südsee und diverse andere medizinische Heldentaten. So entsteht ein beeindruckendes Potpourri deutscher Wissenschaftsgeschichte.

Zu Recht gilt heute der Kolonialismus als eine dunkle Epoche der jüngeren Geschichte, unter deren Folgen viele Entwicklungsländer bis heute zu leiden haben. Gleichwohl war für die deutsche Infektionsmedizin die Zeit von 1870 bis 1910, in der alle wichtigen bakteriellen und parasitären Krankheitserreger identifiziert und beschrieben wurden, eine später niemals wieder erreichte Glanzzeit. Mit dem Fortschreiten biologischer und chemischer Kenntnisse sowie der Entdeckung neuer physikalischer Messmethoden und der Möglichkeit, die Krankheiten in ihrem Umfeld zu studieren, entwickelte sich aus einer rein beschreibenden eine analytische Wissenschaft.

Den Autoren gelingt es, dem Leser den Geist dieser heroischen Epoche detailgetreu zu vermitteln. Durch die Kombination aus Originalzitaten und zahlreichen faszinierenden Illustrationen ist ein Buch entstanden, das für Biologen, Mediziner und Historiker gleichermaßen lesenswert ist. ◁

Hermann Feldmeier

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie sowie Professor am Institut für Infektionsmedizin der Charité in Berlin.

Schritt für Schritt

Ein altes Papier-und-Bleistift-Autorennen zeigt auf, warum Physik die großartigste Form der verlustfreien Datenreduktion ist.

Von Norbert Treitz

Wie geht die Folge 1 4 10 19 31 … weiter? Eine relativ nahe liegende – aber keineswegs die einzig richtige – Möglichkeit besteht darin, sie als arithmetische Folge zweiter Ordnung aufzufassen. Das ist eine Folge, deren Differenzenfolge – die Folge der Differenzen benachbarter Folgenglieder – eine gewöhnliche arithmetische Folge ist, in unserem Fall 3 6 9 12 … Gewöhnliche arithmetische Folgen heißen in diesem Kontext auch »von erster Ordnung«. Das nächste Glied unserer Folge ist demnach 46.

Bilden wir umgekehrt zur Folge der natürlichen Zahlen 0 1 2 3 … die Summenfolge, so finden wir eine arithmetische Folge zweiter Ordnung. Es ist die Folge der Dreieckszahlen 0 1 3 6 10 15 21 … mit der allgemeinen Form $n\cdot(n+1)/2$, was »im Wesentlichen« quadratisch ansteigt, wie auch die Fläche des Dreiecks, das entsteht, wenn man 1, 3, 6, … Spielsteine zeilenweise untereinander schön gleichmäßig auslegt. (Man beachte: Ein Glied einer Summenfolge ist nicht die Summe zweier benachbarter Glieder, sondern die Summe aller bisherigen Glieder der Ursprungsfolge!)

Man kann das zu höheren Ordnungen fortsetzen. Aus den Dreieckszahlen werden durch Bildung der Summenfolge die Tetraederzahlen 0 1 4 10 20 35 …, die »im Wesentlichen« wie n^3 gegen unendlich gehen. Im Pascal'schen Dreieck findet man diese Folgen parallel zu den seitlichen Rändern: ganz außen die nullte Ordnung 1 1 1 1 1 …, dann die erste mit 1 2 3 4 … und so weiter.

Arithmetische Folgen zweiter Ordnung machen sich nützlich bei Problemen wie dem folgenden. Erreichen Sie mit möglichst wenigen ganzzahligen Summanden, deren erster und letzter den Wert 1 haben, die Summe 100, und zwar so, dass jeder Summand sich von seinem Vorgänger maximal um 1 unterscheidet. Die Lösung ist: 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10 + 9 + 8 + 7 + 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 mit den Zwischensummen 0 1 3 6 10 15 21 28 36 45 55 64 72 79 85 90 94 97 99 100.

Das hat eine große Ähnlichkeit mit dem Problem, so schnell wie möglich von einer Kreuzung bis zur nächsten roten Ampel oder von einer U-Bahn-Haltestelle zur nächsten zu fahren, wenn – nicht ganz realistisch – die Beschleunigung nach vorne und nach hinten den gleichen maximalen Betrag haben kann. Die Lösung ist, bis zur Mitte Vollgas zu geben und auf der zweiten Hälfte mit voller Kraft auf die Bremse zu steigen.

Das ist weder besonders ökologisch noch ökonomisch, aber dafür ziemlich übersichtlich. Das arithmetische Problem ist die »Diskretisierung« des Verkehrsproblems. Die Geschwindigkeit ändert sich nicht mehr stetig mit der Zeit, sondern ist über kleine Zeitabschnitte – sagen wir Sekunden – hinweg konstant und ändert sich schlagartig von Sekunde zu Sekunde. Unsere Summanden sind die in jeder Sekunde zurückgelegten Werte. In einem diskretisierten Auto würde man jede Sekunde einen heftigen Schlag in den Rücken beziehungsweise den Bauch verspüren. Aber mit zunehmender Feinheit der Diskretisierung und entsprechend kürzerer Zeiteinheit steigen der Fahrkomfort und die Realitätsnähe. Die Rechnerei wird zwar mehr, bleibt aber im Prinzip so einfach wie im obigen Beispiel.

Ein Brettspiel: Diskretisierung lässt sich auch auf zwei Raumdimensionen anwenden, zum Beispiel auf das elementarste Problem des Straßenverkehrs: Wie mache ich es, dass der Krümmungsradius meiner Fahrt nicht größer ist als derjenige der Straße? Oder in üblicher irreführender Formulierung: Wie vermeide ich es, dass ich – von wem eigentlich? – aus der Kurve getragen werde? Die Antwort ist bekanntlich: hinreichend langsam fahren, vor allem, wenn die Kurve eng und/oder die Straße glatt ist.

Für die diskrete Version brauchen wir nur kariertes Papier und einen Schreibstift. Zuerst wird die Bahn begrenzt, indem Ketten von Kästchen als Hecken und damit für die Autos verboten markiert werden. Übrig bleibt ein Labyrinth von Straßen, die mehrere Kästchen breit sind und einige Kurven haben. Start (-Kästchen) und Ziel(-Linie) werden besonders markiert (Bild rechts unten).

Die wesentliche Spielregel ist nun: Das »Auto« fährt in einem Spielzug m Schritte nach Osten und n nach Norden. m und n sind dabei ganze Zahlen, die positiv oder (für west- und südwärts gerichtete Bewegungen) negativ sein dürfen; sie können von einem Spielzug zum nächsten um höchstens 1 zu- oder abnehmen oder auch gleich bleiben, und zwar m und n unabhängig voneinander. Beim Start sind beide 0, das Ziel darf ohne vorherige Bremsung durchlaufen werden. Die Hecken dürfen nicht befahren und auch nicht übersprungen werden. Wer ein verbotenes Kästchen trifft, muss an den Start zurück und mit $m = n = 0$ neu anfangen (ganz ohne Krankenhausaufenthalt dazwischen; eine Begegnung mit der Hecke geht also ziemlich glimpflich ab).

Ziel des Spiels ist es, mit möglichst wenig Zügen das Ziel zu überqueren. Dazu können die Spieler ihre Autos auf einem gemeinsamen Blatt laufen lassen oder auf einzelnen Kopien derselben Rennbahn. Auf einem Kästchen dürfen mehrere Autos zugleich stehen (sie sind sozusagen punktförmig und klein im Vergleich zum Kästchen). Andere Regeln würden das Spiel zu sehr in eine Variante von »Mensch ärgere dich nicht« ausarten lassen und von der simulierten Kinematik ablenken.

Man merkt sehr bald, dass man durch enge Kurven mit hinreichend kurzen Zügen laufen muss. Ganz vorsichtige Menschen bleiben sogar in jeder Kurve stehen. Man kann aber auch lernen, in zwei Dimensionen fast getrennt zu planen.

Die physikalische Interpretation der Spielregeln ist nahe liegend: Die Schrittzahlen m und n sind die beiden Komponenten des Geschwindigkeitsvektors. Dass man sie in jedem Zeitschritt nur um eine Einheit ändern kann, entspricht den begrenzten Beschleunigungs- und Bremsmöglichkeiten. Im Gegensatz zu einem echten Auto, dessen Fahrverhalten von

▶ **Ein gelungener Lauf durch die diskretisierte Autorennbahn. Die zu den neun Beschleunigungsmöglichkeiten gehörenden Tasten des Ziffernblocks sind in rot bei jeder Position des Autos eingetragen; sie und die Farben der Kreise zeigen die Beschleunigungsrichtungen an.**

den Himmelsrichtungen unabhängig ist, hat allerdings das simulierte Auto in den diagonalen Richtungen etwas größere Freiheiten.

Für den diskretisierten Autofahrer empfiehlt es sich ebenso wie für den echten, in einer Kurve zur Innenseite dieser Kurve hin zu beschleunigen, ohne unbedingt zum Stillstand zu kommen. Zugfolgen mit konstanter Beschleunigung sehen wie Parabeln aus; eine extrem schmale Parabel kann zu einem – hin und zurück durchlaufenen – geraden Strich entarten.

Nahe verwandt mit unserem Papierspiel hinsichtlich der Koordinaten-Aufspaltung ist ein als Geduldsspielzeug erhältliches Holzlabyrinth, bei dem man eine Kugel an vielen Löchern vorbei in ein Ziel bugsieren soll, indem man die Ebene, auf der sie rollt, durch zwei getrennte Stellrädchen – in der Luxusversion sogar mit Untersetzungen – um zwei zueinander rechtwinklige horizontale Achsen kippt. Profaner, aber für die Vorführung im großen Hörsaal geeigneter ist eine Glasplatte mit Schaumstoffpolstern auf der Unterseite, die auf dem Overheadprojektor liegt: Durch Drücken auf eine der vier Seiten setzt sich die Kugel auf der Platte in Bewegung, und es kommt darauf an, sie nicht gegen eine der auf die Platte geklebten »Hecken« prallen zu lassen. In beiden Fällen bleibt allerdings die Zeit »analog«, das heißt ohne erzwungenen Takt.

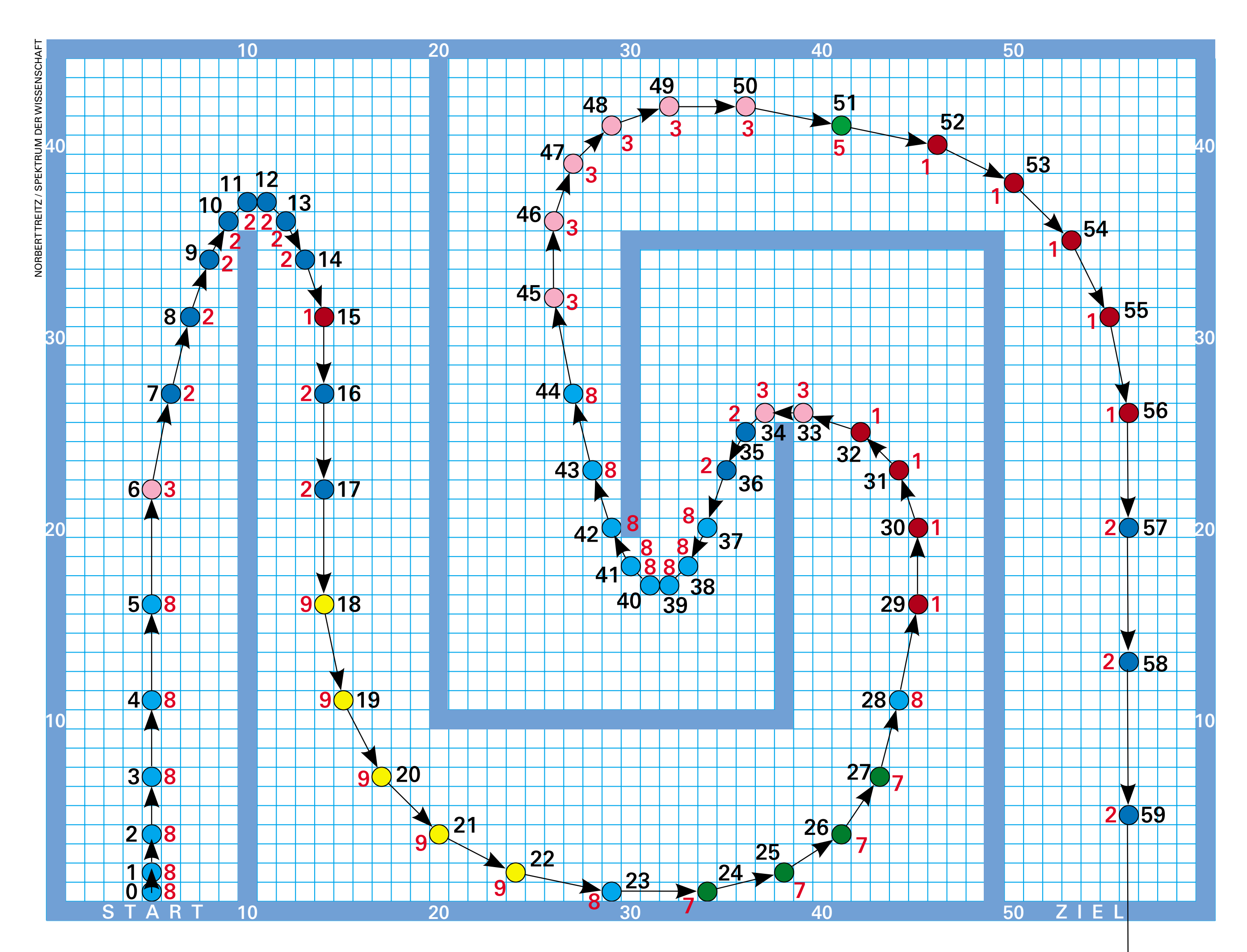
Spielprotokolle und Datenreduktion: In unserem Papier-und-Bleistift-Spiel kann jedes Augenblicksbild durch ein Koordinatenpaar (x, y) beschrieben werden. Die x und die y bilden stückweise, nämlich jeweils so lange, wie die Beschleunigung konstant bleibt, arithmetische Folgen zweiter Ordnung. Durch die entsprechenden Punkte kann man Parabeln – oder im Entartungsfall gerade Striche – legen.

Wenn das Spielfeld a Spalten und b Zeilen von Kästchen hat, so ist der Dateninhalt (der »Informationsgehalt«) eines solchen Bildes gleich $\log(a) + \log(b)$. Die Basis der verwendeten Logarithmen ist beliebig, bestimmt aber die Maßeinheit, in der die Datenmenge anzugeben ist. Bei Zehnerlogarithmen ist es »Anzahl der Dezimalziffern«: Auf einem Spielfeld der Breite 1000 und der Höhe 1000 braucht man $\log_{10}(1000) = 3$ Dezimalziffern, um jede Koordinate darzustellen, insgesamt also sechs Ziffern für die gegenwärtige Position des Autos. Um ein Spiel mit 100 Zügen vollständig wiederzugeben, braucht man insgesamt 600 Dezimalziffern.

Computerfachleute rechnen lieber mit der Basis 2 statt 10. Die zugehörige Maßeinheit für die Datenmenge ist das Bit (*binary digit* oder auch Binärziffer).

Bei dieser Berechnung haben wir noch nicht berücksichtigt, dass unser Auto so beschleunigungsarm fährt, wie es die Spielregeln vorschreiben. Die Datenmenge wäre bei einem kreuz und quer über das Feld springenden Auto die gleiche. Kann man das Spielprotokoll vereinfachen?

Die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Positionen ist die (als Vek- ▷



t	x	v_x	a_x	y	v_y	a_y	Taste
0	5	0	0	1	1	1	8
1	5	0	0	2	2	1	8
2	5	0	0	4	3	1	8
3	5	0	0	7	4	1	8
4	5	0	0	11	5	1	8
5	5	0	0	16	6	1	8
6	5	1	1	22	5	–1	3
7	6	1	0	27	4	–1	2
8	7	1	0	31	3	–1	2
9	8	1	0	34	2	–1	2
10	9	1	0	36	1	–1	2
11	10	1	0	37	0	–1	2
12	11	1	0	37	–1	–1	2
13	12	1	0	36	–2	–1	2
14	13	1	0	34	–3	–1	2
15	14	0	–1	31	–4	–1	1
16	14	0	0	27	–5	–1	2
17	14	0	0	22	–6	–1	2
18	14	1	1	16	–5	1	9
19	15	2	1	11	–4	1	9
20	17	3	1	7	–3	1	9
21	20	4	1	4	–2	1	9
22	24	5	1	2	–1	1	9
23	29	5	0	1	0	1	8
24	34	4	–1	1	1	1	7
25	38	3	–1	2	2	1	7
26	41	2	–1	4	3	1	7
27	43	1	–1	7	4	1	7
28	44	1	0	11	5	1	8
29	45	0	–1	16	4	–1	1
30	45	–1	–1	20	3	–1	1
31	44	–2	–1	23	2	–1	1
32	42	–3	–1	25	1	–1	1
33	39	–2	1	26	0	–1	3
34	37	–1	1	26	–1	–1	3
35	36	–1	0	25	–2	–1	2
36	35	–1	0	23	–3	–1	2
37	34	–1	0	20	–2	1	8
38	33	–1	0	18	–1	1	8
39	32	–1	0	17	0	1	8
40	31	–1	0	17	1	1	8
41	30	–1	0	18	2	1	8
42	29	–1	0	20	3	1	8
43	28	–1	0	23	4	1	8
44	27	–1	0	27	5	1	8
45	26	0	1	32	4	–1	3
46	26	1	1	36	3	–1	3
47	27	2	1	39	2	–1	3
48	29	3	1	41	1	–1	3
49	32	4	1	42	0	–1	3
50	36	5	1	42	–1	–1	3
51	41	5	0	41	–1	0	5
52	46	4	–1	40	–2	–1	1
53	50	3	–1	38	–3	–1	1
54	53	2	–1	35	–4	–1	1
55	55	1	–1	31	–5	–1	1
56	56	0	–1	26	–6	–1	1
57	56	0	0	20	–7	–1	2
58	56	0	0	13	–8	–1	2
59	56			5			

Vier Formen des Protokolls: die Spielzüge aus dem vorigen Bild als Orte (x,y) des Autos zur jeweiligen Zeit t, als Geschwindigkeiten (v_x,v_y), als Beschleunigungen (a_x,a_y) oder deren Darstellung durch Zifferntasten von 1 bis 9.

tor zu verstehende) Geschwindigkeit unseres diskretisierten Autos im entsprechenden Zeitintervall, und die Differenzen dieser Differenzen (die »Differenzenfolge zweiter Ordnung«) entsprechen den Beschleunigungen. Die aber können nach der Spielregel in jeder Komponente nur –1, 0 oder +1 sein und damit pro Spielzug nur einen von neun verschiedenen Werten annehmen. Wir können das ganze Spiel also durch den Anfangsort, die Anfangsgeschwindigkeit und die Beschleunigungsvektoren aller folgenden Züge (diese jeweils durch eine von 9 Ziffern) eindeutig protokollieren, im genannten Zahlenbeispiel also mit 100 Dezimalziffern (eigentlich sogar etwas weniger).

Aus diesem Protokoll kann man den ganzen Spielablauf rekonstruieren. Es sind also keine Daten verloren gegangen; aber die Möglichkeit dieser Datenreduktion funktioniert so wirkungsvoll nur wegen der engen Begrenzung der Beschleunigung. In der Realität heißt das, dass ein Auto in den jeweils nächsten Sekunden nur eine begrenzte Auswahl von Aufenthaltsorten hat (das ist auch als »Trägheitsprinzip« bekannt).

Vom Papier zum Bildschirm: Als ich am Karnevalswochenende 1980 meinen ersten Bildschirm-Computer (mit 8 Kilobyte Arbeitsspeicher) kaufte, schrieb ich wenige Tage später ein Autorennspiel, bei dem die im quadratischen Block stehenden neun Zifferntasten den neun Kombinationen aus den diskreten Komponenten –1, 0 und +1 zugeordnet waren. Es ist eins von den Programmen, die auch heute nicht schneller laufen als damals. Statt der Tastatur kann man die Maus oder einen Joystick als Beschleunigungsgeber nutzen und das Simulationsspiel mit den inzwischen erweiterten Rechenmöglichkeiten realistischer gestalten. Dann ist man bald bei den kommerziellen Rennspielen, die einem die Bahn stets aus der Perspektive des Autofahrers zeigen.

Aber das ist nicht mehr das Entscheidende: Wenn Sie einen Computer haben und programmieren können, wie man einen Punkt auf eine vorher gewählte Stelle des Bildschirms malt, empfehle ich, zumindest das Papierspiel damit nachzubilden. Die wesentliche Existenzberechtigung der Computersimulation für den Unterricht besteht nicht in der bloßen Nachbildung der Realität (synthetisches Kino), sondern im Aufzeigen der Zusammenhänge mit theoretischen Aussagen (Formeln, Programmanweisungen) und von unsichtbaren Messgrößen, etwa durch mitlaufende Vektorpfeile oder variable Darstellungen von Energiebilanzen parallel zum sichtbaren Ablauf. Die Verwechslung mit der Realität kann nicht der Sinn didaktischer Simulationen sein.

Noch weniger Freiheit: Nun stellen wir uns einen ganz fantasielosen Autofahrer vor, der nach dem (fliegenden) Start nur noch mit konstanter Bosheit nach Süden beschleunigt. Das Protokoll ist nun noch einfacher: Außer den Startwerten enthält es nur die einmalige Angabe der konstanten Beschleunigung. Die Kurve ist dann eine Parabel mit der Öffnung nach Süden. Nennen wir diese Richtung »unten« statt »Süden«, so bekommen wir die Wurfparabel im homogenen Schwerefeld mit der Differenzialgleichung $d^2y/dt^2 = -g$.

Wir können auch kompliziertere Festlegungen treffen, solange diese während des Ablaufs keiner Willkür mehr unterliegen, also vorprogrammierte Bahnen beschreiben. So können wir die Beschleunigung von einer Ortskoordinate oder einem Radiusbetrag abhängig machen und damit eine schwingende Masse an der Schraubenfeder beziehungsweise die Bewegung eines Planeten um die Sonne modellieren. Oder wir machen die Beschleunigung vom Geschwindigkeitsvektor abhängig und beschreiben damit Reibungsphänomene. Damit sind im Prinzip schon die wichtigsten kinematischen Simulationen erfasst.

Zugleich bekommen wir nun einen Blick auf das Wesen der Physik: Wären die Ereignisse der Natur regellos und allesamt »rein zufällig«, so könnten wir zwar für die Nachwelt Protokolle des Geschehens anfertigen, wie es auch die Historiker tun. Dass gewisse Ereignisse sich wiederholen wie die Gezeiten, die Jahreszeiten oder die Zyklen der Sonnen- und Mondfinsternisse, erlaubt bereits eine gewaltige Reduktion der Daten: Alte Kalender lassen sich bezüglich ge-

wisser Merkmale weiterverwenden, und die Protokolle erlauben Vorhersagen, auch weit ab von irgendeinem kausalen Verständnis. Gezeiten-Rechenmaschinen mit Zahnrädern extrapolieren nur vorhandene Messungen und rechnen nicht die komplizierte Hydromechanik der Küstenprofile, und ähnlich mögen die Steine in Stonehenge für die Vorhersage von Finsternissen genutzt worden sein.

Datenreduktion: Findet man darüber hinaus Regeln – die in der Physik meistens als Differenzialgleichungen formuliert sind –, so ersetzen diese zusammen mit den Daten für die Anfangswerte lange Tabellen mit erfassten Daten.

Das hat große Ähnlichkeit mit der Kompression von Bilddateien. Wenn das Bild aus einem feinkörnigen Zufallsmuster besteht, muss es bitweise gespeichert werden. Wiederholungen oder stückweise gleiche Farben erlauben bereits beachtliche Reduktionen ohne Datenverlust. Wenn das Bild aber die japanische Flagge darstellt, so genügt die Angabe des Kreisdurchmessers und der beiden verwendeten Farben: Das »Malprogramm« für den Kreis ist wesentlich kürzer als das Protokoll der Millionen Pixel. Ein solches einfaches Malprogramm entspricht hinsichtlich der Datenreduktion einem Naturgesetz in der Physik. Es gehört zu den großartigsten Eigenschaften unseres Gehirns, dass es in gewaltigem Ausmaß Daten im visuellen Bereich und bei der natürlichen (nicht formalisierten) Sprache reduziert.

Die Bezeichnung »Naturgesetz« ist eine Metapher, die auf gesetzestreue Bürger zurückgreift, denn die Natur kann ja nicht gegen ihre Gesetze verstoßen. Allenfalls können wir bei ihrem Auffinden Fehler oder Unvollständigkeiten begehen. Der Vergleich mit den Regeln des Spiels auf dem karierten Papier passt eigentlich besser: Die Natur verhält sich in gewissem Umfang »regelmäßig«, und wir versuchen diese Regeln zu ergründen, wie ein Alien die Regeln eines Fußballspiels (oder ein Europäer die des Baseballs) durch bloßes Zuschauen zu ergründen suchen könnte.

Dass es Physik überhaupt gibt, hat zwei Voraussetzungen: dass die Natur sich zumindest teilweise regeltreu verhält, und dass unser Gehirn die Fähigkeit hat, zumindest einige solcher Regeln zu erkennen und damit die einlaufenden Daten zu bündeln (reduzieren) und für Vorhersagen zu nutzen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrern, sondern auch zur Förderung hoch begabter Jugendlicher.

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

In der Werkstatt der Hirnverzwirner. Von Otto Botsch. Aulis, Köln 1979

PREISRÄTSEL

Alternatives Wohnen

Von Roland Mildner

Im Zahlenhaus mit seinen 3 · 3 Wohnungen dürfen nur natürliche Zahlen wohnen, die alle voneinander verschieden sind. Außerdem muss das Produkt der Zahlen jeder Zeile und jeder Spalte stets 2010 ergeben (Beispiel rechts). Wie viele verschiedene Möglichkeiten gibt es, das Haus zu beziehen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zwei Kugelbahnen »VIA«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. Mai 2005, eingehen.

1	10	201
134	3	5
15	67	2

Lösung zu »Zahlen gesucht!« (März 2005)

1978 ist die einzige Zahl, welche die Bedingung erfüllt.

Eckart Lassnig aus Wien bezeichnete die vierstellige Zahl mit *abcd*, wobei *a* die Tausenderstelle ist. Die Angaben aus dem Text setzte er in folgende drei Gleichungen um:

(1) $b = a + d$

(2) $c^2 = b + 5d$

(3) $d = a + c$

Addiert man (1) und (3), so ergibt sich

(4) $b = 2a + c$

Setzt man die Gleichungen (4) und (3) in Gleichung (2) ein, so folgt

$$c^2 = 2a + c + 5(a+c)$$

oder zusammengefasst

$$c(c-6) = 7a\ .$$

Nun probiert man für c alle ganzen Zahlen von 0 bis 9 durch und erhält $a = 0$ für $c = 0$ und $c = 6$ sowie $a = 1$ für $c = 7$. Alle anderen Lösungen sind keine ganzen Zahlen. Damit bleibt nur $a = 1$ und $c = 7$ für eine wirklich vierstellige Zahl ohne Null am Anfang. Einsetzen ergibt die noch fehlenden Ziffern.

Der Gewinner des Experimentierkastens »Kachelmann Wetterstation« ist Hans J. Muschik, Germering.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

wisser Merkmale weiterverwenden, und die Protokolle erlauben Vorhersagen, auch weit ab von irgendeinem kausalen Verständnis. Gezeiten-Rechenmaschinen mit Zahnrädern extrapolieren nur vorhandene Messungen und rechnen nicht die komplizierte Hydromechanik der Küstenprofile, und ähnlich mögen die Steine in Stonehenge für die Vorhersage von Finsternissen genutzt worden sein.

Datenreduktion: Findet man darüber hinaus Regeln – die in der Physik meistens als Differenzialgleichungen formuliert sind –, so ersetzen diese zusammen mit den Daten für die Anfangswerte lange Tabellen mit erfassten Daten.

Das hat große Ähnlichkeit mit der Kompression von Bilddateien. Wenn das Bild aus einem feinkörnigen Zufallsmuster besteht, muss es bitweise gespeichert werden. Wiederholungen oder stückweise gleiche Farben erlauben bereits beachtliche Reduktionen ohne Datenverlust. Wenn das Bild aber die japanische Flagge darstellt, so genügt die Angabe des Kreisdurchmessers und der beiden verwendeten Farben: Das »Malprogramm« für den Kreis ist wesentlich kürzer als das Protokoll der Millionen Pixel. Ein solches einfaches Malprogramm entspricht hinsichtlich der Datenreduktion einem Naturgesetz in der Physik. Es gehört zu den großartigsten Eigenschaften unseres Gehirns, dass es in gewaltigem Ausmaß Daten im visuellen Bereich und bei der natürlichen (nicht formalisierten) Sprache reduziert.

Die Bezeichnung »Naturgesetz« ist eine Metapher, die auf gesetzestreue Bürger zurückgreift, denn die Natur kann ja nicht gegen ihre Gesetze verstoßen. Allenfalls können wir bei ihrem Auffinden Fehler oder Unvollständigkeiten begehen. Der Vergleich mit den Regeln des Spiels auf dem karierten Papier passt eigentlich besser: Die Natur verhält sich in gewissem Umfang »regelmäßig«, und wir versuchen diese Regeln zu ergründen, wie ein Alien die Regeln eines Fußballspiels (oder ein Europäer die des Baseballs) durch bloßes Zuschauen zu ergründen suchen könnte.

Dass es Physik überhaupt gibt, hat zwei Voraussetzungen: dass die Natur sich zumindest teilweise regeltreu verhält, und dass unser Gehirn die Fähigkeit hat, zumindest einige solcher Regeln zu erkennen und damit die einlaufenden Daten zu bündeln (reduzieren) und für Vorhersagen zu nutzen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrern, sondern auch zur Förderung hoch begabter Jugendlicher.

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

In der Werkstatt der Hirnverzwirner. Von Otto Botsch. Aulis, Köln 1979

PREISRÄTSEL

Alternatives Wohnen

Von Roland Mildner

Im Zahlenhaus mit seinen 3 · 3 Wohnungen dürfen nur natürliche Zahlen wohnen, die alle voneinander verschieden sind. Außerdem muss das Produkt der Zahlen jeder Zeile und jeder Spalte stets 2010 ergeben (Beispiel rechts). Wie viele verschiedene Möglichkeiten gibt es, das Haus zu beziehen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zwei Kugelbahnen »VIA«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. Mai 2005, eingehen.

1	10	201
134	3	5
15	67	2

Lösung zu »Zahlen gesucht!« (März 2005)

1978 ist die einzige Zahl, welche die Bedingung erfüllt.

Eckart Lassnig aus Wien bezeichnete die vierstellige Zahl mit *abcd*, wobei *a* die Tausenderstelle ist. Die Angaben aus dem Text setzte er in folgende drei Gleichungen um:

(1) $b = a + d$

(2) $c^2 = b + 5d$

(3) $d = a + c$

Addiert man (1) und (3), so ergibt sich

(4) $b = 2a + c$

Setzt man die Gleichungen (4) und (3) in Gleichung (2) ein, so folgt

$$c^2 = 2a + c + 5(a + c)$$

oder zusammengefasst

$$c(c-6) = 7a\ .$$

Nun probiert man für c alle ganzen Zahlen von 0 bis 9 durch und erhält $a = 0$ für $c = 0$ und $c = 6$ sowie $a = 1$ für $c = 7$. Alle anderen Lösungen sind keine ganzen Zahlen. Damit bleibt nur $a = 1$ und $c = 7$ für eine wirklich vierstellige Zahl ohne Null am Anfang. Einsetzen ergibt die noch fehlenden Ziffern.

Der Gewinner des Experimentierkastens »Kachelmann Wetterstation« ist Hans J. Muschik, Germering.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Von Katzen, Ratten und Blutverdünnern

Eine schlichte Molekülfamilie aus Minze und Klee dient zur Schädlingsabwehr, als Sexuallockstoff, zur Blutverdünnung und als wohlriechende Essenz.

Von Roald Hoffmann

Katzen sind verrückt nach Katzenminze. Mit deren Extrakt aromatisierte Spielsachen verkaufen sich glänzend in jedem Zooladen und werden inzwischen sogar im Internet angeboten (Bild unten). Der eigentliche Wirkstoff in der Pflanze mit dem offiziellen Namen *Nepeta cataria* heißt Nepetalacton. Es ist ein so genanntes cyclopentanoides Monoterpen – im Grunde eine recht einfach gebaute organische Substanz (Bild rechts oben). Schon vor rund fünfzig Jahren hat mein Kollege Jerry Meinwald ihre Struktur bestimmt. Das Grundgerüst besteht aus einem sechseckigen Ring (dessen Bestandteil $C-O-C=O$ ihn als »Lacton« ausweist), an dem ein Fünfring hängt.

Nepetalacton löst bei Katzen eine psychosexuelle Reaktion aus: Sie strecken und reiben sich oder rollen sich zusammen. Dafür genügen schon Konzentrationen von einem Teil pro Milliarde (ppb) oder weniger. Und der Stoff wirkt angeblich auch auf andere Felidae, einschließlich Löwen. Das würde ich gerne einmal sehen!

▼ **Auch im Internet gibt es Angebote für Produkte mit Katzenminze.**



LINKS: TRIXIE; RECHTS OBEN: WWW.ZOOPLUS.DE; RECHTS UNTEN: CATNIPLINE

Nicht für die Katz!

Aber was bringt das der Katzenminze? Sie hat die Substanz bestimmt nicht entwickelt, um Samtpfoten verrückt zu machen. Auch zur Pollenübertragung und Fortpflanzung wird Nepetalacton nicht gebraucht. Wozu also könnte es sonst dienen? Vor über vierzig Jahren stellte sich Tom Eisner dieselbe Frage. Er machte dazu Versuche und beschrieb sie in einem Artikel, dessen Stil so klar und jargonfrei ist, dass jeder Chemiestudent im ersten Semester ihn mühelos versteht. Eisners Hypothese war, dass der Wirkstoff von Katzenminze Schädlinge abwehrt. Ich zitiere:

»Diese Möglichkeit wurde mit einer Reihe von einfachen Experimenten untersucht.

Eines bestand darin, die Reaktion verschiedener Insekten auf Nepetalacton-Dämpfe zu untersuchen. Dazu wurde eine Glaskapillare, deren Spitze mit der reinen flüssigen Substanz gefüllt war, in einer Entfernung von einigen Millimetern auf die Tiere gerichtet. Die Insekten im Experiment waren ein bunt zusammengewürfelter Haufen, der sich nachts auf einer beleuchteten Oberfläche niedergelassen hatte. Die meisten zeigten eine deutliche

Ausweichreaktion, deren Heftigkeit von Spezies zu Spezies variierte. Die Köcherfliegen schwirrten sofort ab. Die Pflanzenkäfer ließen sich auf den Boden fallen (was viele Käfer bei einer Störung machen). Alle anderen wandten sich einfach von der Kapillare ab und krochen davon.«

Nepetalacton vertreibt also Insekten. Das kann ein evolutionärer Vorteil sein – Teil der Verteidigungsstrategie, mit der sich die Katzenminze vor Fraßschädlingen schützt. Wie mein Freund Haruko Kazama von der Internationalen Christlichen Universität in Tokio sagt: »Pflanzen sind nicht etwa deshalb sesshaft, weil sie primitiv wären oder sich nicht bewegen könnten, sondern weil sie über ein ausgeklügeltes System verfügen, ihre Umgebung wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Sie brauchen nicht wegzulaufen ...«

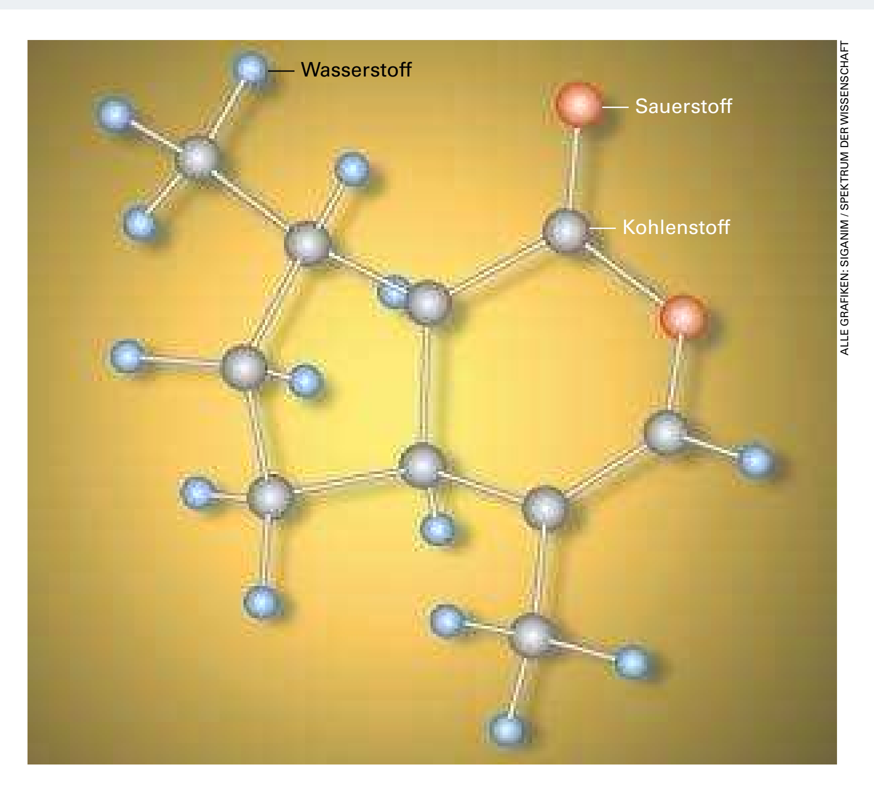
Paradoxerweise tauchte Nepetalacton als Nächstes ausgerechnet in einem Insekt auf, nämlich in der Stabheuschrecke. Wie die Katzenminze möchte diese das Gefressenwerden vermeiden – ein Wunsch, den sie mit den meisten Organismen teilt. Viele Pflanzen und Tiere nutzen deshalb Chemikalien zur Insektenabwehr, von denen aber nicht alle so gut wirken wie Nepetalacton. Dieses übertrifft (bezogen auf das Gewicht) als Mückenschutz sogar das gebräuchliche N,N-diethyl-m-toluamid, das bis 1998 in Deutschland Bestandteil von Autan war, aber nun im Verdacht steht, neurologische Schäden zu verursachen.

Die biologische Rolle von Nepetalacton erschöpft sich damit aber noch lange nicht. So locken weibliche Blattläuse in einer bizarren Umkehr der Verhältnisse mit einem Duftcocktail, der die Substanz enthält, Männchen an. Solche Umdeutungen sind allerdings riskant. Parasitäre Wespen, die es auf Blattläuse als lebende Brutplätze abgesehen haben, können das Molekül nämlich ebenfalls wahrnehmen. So setzt man heute synthetisches Nepetalacton zum Anlocken von Schlupfwespen als Mittel gegen Blattlausbefall ein.

Nomen est omen?

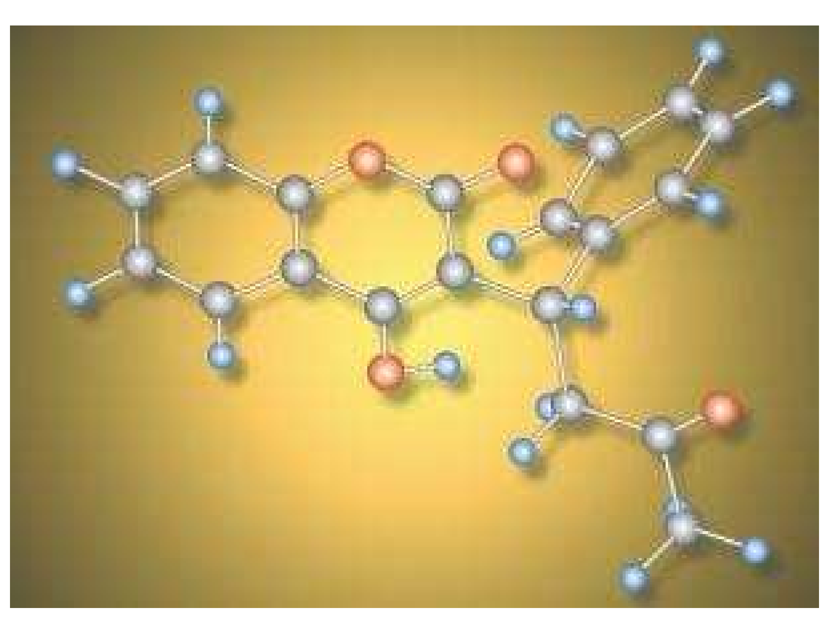
Der Ausgangspunkt für mein Interesse an dieser Substanz und ihren Verwandten liegt im St.-Vincent-Krankenhaus in New York, wo meine Mutter nach einem Herzinfarkt das Mittel Marcumar erhielt. Einige Tage später fiel mein Blick auf einen Artikel in der »New York Times«, der über eine brandaktuelle Veröffentlichung im »New England Journal of Medicine« berichtete. Darin zeigten Paul Radker und seine Kollegen vom Brigham and Women's Hospital in Boston, dass sich mit einer neuen, milden Rezeptur von Marcumar die Entstehung von Blutgerinnseln verhüten lässt. Wegen meiner Mutter las ich den Artikel aufmerksamer als gewöhnlich und erfuhr auch den ursprünglichen Namen des Wirkstoffs. Er lautet Warfarin.

Ich stutzte – steckte in der Bezeichnung doch das englische Wort *warfare*, also Krieg. Wer würde ein lebenserhaltendes Medikament mit einem Namen direkt aus dem Lande Mordor versehen? Weitere Nachforschungen ergaben, dass Warfarin – die Struktur ist unten abgebildet – zunächst als Rattengift diente und als Mortalin-Warfarin, Rodex, Rattentod oder Vigor-Kill-Rat auf den Markt kam. Das Rätsel des Namens schien damit geklärt. Doch ich täuschte mich. Wie sich am Ende heraus- ▷



▲ **Der Wirkstoff von Katzenminze heißt Nepetalacton. Das Molekül enthält einen sechseckigen Lactonring (gekennzeichnet durch die Gruppierung C–O–C=O), an dem ein Fünfring hängt.**

▼ **Auch im Grundgerüst des Blutverdünners Warfarin kommt ein Lactonring vor, an dem diesmal allerdings ein weiterer Sechsring sitzt.**



Cumarin ist der Aromastoff von Waldmeister und bildet die Grundstruktur, von der sich Warfarin und andere Blutverdünner ableiten.

▷ stellte, leitet sich die Bezeichnung von den Initialen der Wisconsin Alumni Research Foundation ab, die den Stoff patentierte.

Die Geschichte des Blutverdünnungs-Rattengifts reicht zurück ins frühe 20. Jahrhundert, als Viehzüchter in den nordamerikanischen Prärien den Süßklee einführten. 1924 beobachteten Rancher in Alberta (Kanada), dass Vieh, das verschimmelten Klee gefressen hatte, an inneren Blutungen verendete; als verantwortlicher Wirkstoff erwies sich Dihydroxycumarin. Es leitet sich vom Cumarin ab, dessen Grundgerüst wie das von Nepetalacton einen Lactonring enthält; der daran hängende zweite Ring ist allerdings sechs- statt fünfgliedrig (Bild links).

Innerhalb eines Jahres gelang es, das Molekül zu synthetisieren, und schon bald wurde es als Antikoagulans (Blutgerinnungshemmer) eingesetzt. Währenddessen entwickelten die Biochemiker Mark A. Stahmann und Karl P. Link an der Universität von Wisconsin das Warfarin, gleichfalls ein Cumarinderivat, und vermarkteten es als Mittel gegen Nager. Es dauerte zehn Jahre, bis diese Substanz als Blutverdünner in die klinische Praxis gelangte.

Cumarin kommt auch im Waldmeister vor, dem es seinen besonderen Geschmack verleiht. Laut Merck-Index hat es einen »angenehmen Geruch, der dem von Vanilleschoten ähnelt«. Früher diente es deshalb gelegentlich als Verstärker für Vanille – eine Praxis, die vor einiger Zeit aus offensichtlichen Gründen verboten wurde. Auch danach tränkten Zigarrenhersteller allerdings noch bisweilen Tabakblätter zur Verbesserung des Aromas in Cumarin.

Was hat nun der Klee von der Substanz? Wieder geht es um Verteidigung. Außerdem ist Süßklee nicht das einzige Gewächs, das Abkömmlinge des Cumarins zur Schädlingsabwehr nutzt. Viele Pflanzen bedienen sich zu diesem Zweck der Furocumarine, bei denen Cumarin an einen fünfeckigen Furanring gebunden ist. May Berenbaum von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign konnte zum Beispiel nachweisen, dass die Pastinake – ein bei uns kaum noch bekanntes rübenartiges Gemüse – sich mit solchen Verbindungen wirksam vor räuberischen Insekten schützt.

Ein besonderer Trick dabei ist, dass Furocumarine photodynamisch wirken: Erst Sonnenlicht löst ihre toxischen Effekte im Tier aus. Auch Menschen sind keineswegs immun: So gibt es einen wissenschaftlichen Bericht über eine »Sellerie-Phytophotodermatitis bei einem Küchenchef«. Eine ungenannte junge Frau schaffte es mit einer »Club-Med-Photodermatitis« in die medizinische Literatur. Auslöser war ein Spiel am Swimming-Pool, bei dem Limetten zwischen den Schenkeln gerollt werden mussten. Also Vorsicht vor unsachgemäßem Umgang mit Obst!

Kürzlich erschien das Buch »Stalin's Last Crime: The Plot Against the Jewish Doctors, 1948–1953« bei HarperCollins (New York 2003). Gestützt auf einen Geheimbericht über Stalins letzte Tage im März 1953, vertreten Jonathan Brent und Vladimir Naumov darin unter anderem die These, der Diktator könne vergiftet worden sein – und zwar mit Warfarin. Der leicht herzustellende Stoff war damals wohl ohne Weiteres erhältlich. Auch passen Stalins Symptome ins Bild: Er litt an Hirn- und Magenblutungen, wobei Letztere aus dem gerichtsmedizinischen Bericht getilgt wurden. Brent und Naumov, die in dem Buch vor allem die letzte große Judenverfolgung unter Stalin beschreiben, bleiben den eindeutigen Beweis für ihre Hypothese schuldig. Aber sie haben keine Mühe, Gründe für eine Vergiftung des Diktators anzuführen – und auch mögliche Täter.

Chemische Spielereien der Natur

All diese Moleküle sind einfach. Pflanzen synthetisieren Cumarin aus der Aminosäure Phenylalanin. Die Ausgangsstoffe für Nepetalacton und andere Monoterpene sind zwei Ketten mit je fünf Kohlenstoffatomen namens Isopren, dem Grundbaustein von Kautschuk. Die Lactongruppe in Warfarin und Nepetalacton ist auch nichts Besonderes, sondern nur das Ergebnis einer gewöhnlichen Veresterung: der Reaktion zwischen organischen Säuren und Alkoholen (oder Aldehyden), bei der viele Fruchtaromen entstehen. Lactonringe kommen in zahllosen Naturstoffen vor; das Antibiotikum Erythromycin enthält zum Beispiel ein riesiges Exemplar.

Mein kurzer Streifzug durch diese kleine Gruppe verwandter Moleküle sollte Ihnen einen Eindruck davon verschafft haben, wie die Natur gekonnt mit der Chemie spielt. Insekten sind darin wahre Meister. Doch nicht nur sie nutzen einfache bis hochkomplexe Reaktionen, um sich im Daseinskampf zu behaupten und im evolutionären Wettrüsten die Nase vorn zu behalten. Wie Tiere und Pflanzen die Biochemie für ihre Zwecke einspannen, ist ein faszinierendes Schauspiel. Sehe ich die Vielfalt dessen, was eine eng begrenzte Molekülgruppe in Minze und Klee bewirkt – sie macht Katzen verrückt, schreckt Insekten ab, lockt Blattlausmännchen an, hilft Ratten vertilgen, duftet angenehm und verhütet Blutgerinnsel –, habe ich als Chemiker ein gutes Gefühl.

Und nicht nur als Chemiker. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



LOIS ANSHUS

Roald Hoffmann ist Chemie-Nobelpreisträger und Frank-H.-T.-Rhodes-Professor of Humane Letters an der Abteilung für Chemie und Chemische Biologie der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York).

Buzzwords: a scientist muses on sex, drugs, and rock and roll. Von M. R. Berenbaum. Joseph Henry Press, Washington 1995

Chemical aspects of biosynthesis. Von J. Mann. Oxford University Press, 1994

Catnip, its raison d'être. Von T. Eisner in: Science, Bd. 146, S. 1318, 4.12.1964

Reparatur nach Herzinfarkt

Um den Langzeitfolgen eines Herzinfarkts zu begegnen, müsste man das abgestorbene Gewebe regenerieren. Bioingenieure entwickeln nun Verfahren, neue Muskelzellverbände mitsamt Blutgefäßen im Herzen selbst zu züchten

ANITA KUNZ

WEITERE THEMEN IM JUNI

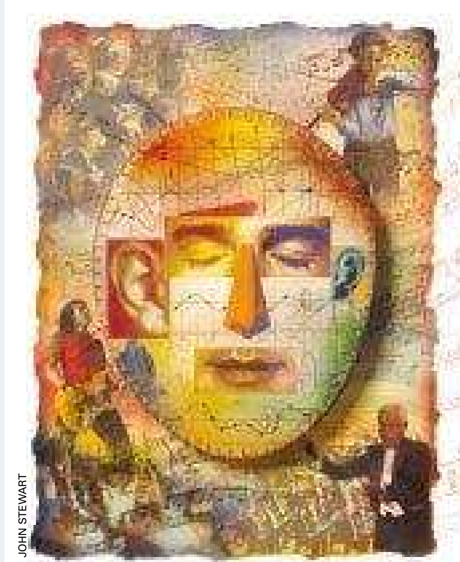
Wie entscheide ich richtig?

Fehler sind unvermeidlich; da ist es hilfreich, einem Verfahren zu folgen, mit dem man – mathematisch beweisbar – nicht mehr Fehler macht als unvermeidlich

Wasserstoff

Kommt sie oder kommt sie nicht? An der Wasserstoffwirtschaft geht kein Weg vorbei, meinen die einen; sie sei auf absehbare Zeit nicht zu bezahlen, die anderen

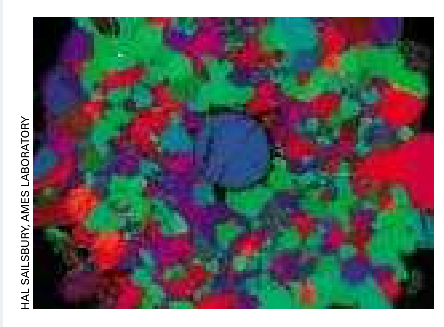
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



JOHN STEWART

Musik als Gehirnmanipulator

Seit Urzeiten prägt Musik den Menschen. Sie vermag das Verhalten von Hirnneuronen erstaunlich stark – und schnell – zu verändern. Offenbar bleiben die Höreindrücke lange bestehen



HAL SAILSBURY, AMES LABORATORY

Heiße Aussichten für Tieftemperatur-Supraleiter

Die Verbindung Magnesiumdiborid leitet bereits bei 40 Kelvin Strom verlustfrei – was eine Vielzahl von interessanten Anwendungen verspricht